



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Ilmakolmioinnin laadunvalvonta fotogrammetristen pintamallien ja laserkeilausaineiston avulla

Aalto-yliopiston insinöörیتieteiden korkeakoulun
maankäyttötieteiden laitoksella tehty diplomityö

Espoo, toukokuu 2014

Tekniikan kandidaatti Jesperi Rantanen

Valvoja: Professori Henrik Haggrén
Ohjaajat: Diplomi-insinööri Risto Ilves ja
tekniikan tohtori Petri Rönnholm

Tekijä Jesperi Rantanen		
Työn otsikko Ilmakolmioinnin laadunvalvonta fotogrammetristen pintamallien ja laserkeilausaineiston avulla		
Koulutusohjelma Geomatiikka		
Pääaine Fotogrammetria ja kaukokartoitus	Professuuri Maa-57	
Valvoja Prof. Henrik Haggrén		
Ohjaajat DI Risto Ilves ja TkT. Petri Rönholm		
Päivämäärä 26.05.2014	Sivumäärä 7+62	Kieli Suomi

Tiivistelmä

Ilmakolmioinnissa ratkaistaan kartoituksen ilmakuvablokin kuvien sijainti- ja asentotiedot eli orientoinnit. Orientointeihin mahdollisesti tasoituslaskun jälkeen jäävää virhettä tutkittiin vertaamalla ilmakuvista tehtyä fotogrammetrista pintamallia ja laserkeilausaineistosta tehtyä pintamallia. Kirjallisuusosa käsitteli näiden pintamallien teoriaa ja tutki erilaisia algoritmeja.

Useita menetelmiä pintamallien muodostamiseen ja erotuksen laskemiseen kokeiltiin mutta näiden välillä on lähtökohtaisesti yli metrin systemaattinen ero. Avoimilla alueilla ero on keskimäärin vain 0.13 m mutta metsäisillä alueilla jopa 4 metriä. Kun kaikkien ilmakuvien sijainnissa on 1 tai 2 m samansuuntainen virhe, ero näkyy pintamalleissa vain, jos virhe on korkeussuunnassa, jolloin se siirtyy suoraan mallien erotukseen. Jos vain yhden kuvan sijaintia poikkeutetaan mihin tahansa suuntaan, se aiheuttaa vääristymän pintamalliin. Alle kahden metrin vääristymät eivät kuitenkaan ole vielä näkyviä. Menetelmä ei vaadi kohtuuttomasti aktiivista työaikaa, joten sillä on kuitenkin potentiaalia ilmakuvauksen laadunvalvonnassa, jos mallien välistä systemaattista eroa voidaan vähentää.

Avainsanat Ilmakolmiointi, laserkeilaus, laadunvalvonta, maastonpintamalli

Author Jesperi Rantanen		
Title Quality assurance of aerial triangulation using photogrammetric surface models and laser scanning data		
Programme Geomatics		
Main Photogrammetry and remote sensing	Professorship Maa-57	
Supervisor Prof. Henrik Haggrén		
Advisors M.Sc. (Tech) Risto Ilves and D.Sc. (tech) Petri Rönnholm		
Date 26.05.2014	Pages 7+62	Language Suomi

Abstract

Aerial triangulation is used to solve attitude and position information of aerial image block. Possible errors left after the triangulation were studied by comparing a photogrammetric surface model made from aerial mapping images to surface model made using laser scanning. Literature review studied the theory of these surface models and different algorithms used to create them.

Several methods and areas are tested to compute a difference between the two surface models but there is a fundamental one metre elevation difference between the models. On open areas like fields the difference is only 0.13 metres but is up to 4 metres in forest areas. If all the triangulated images have 1 or 2 metre error in their positioning, the error is visible only if it is in height coordinate. If the position of one image has an error of 1 or 2 metres it causes a deformation in the surface model. Deformations smaller than two metres in size are not visible however because of large random errors. Nevertheless, the method does not require large amounts of active working time to compute so it has potential in aerial triangulation quality assurance if the systematic error between the data sets can be decreased.

Keywords Aerial triangulation, laser scanning, quality assurance, terrain surface model

Esipuhe

Tämä, kuten moni muukin diplomityö, vei tekijältään enemmän aikaa kuin osasi arvata. Haluan kiittää tässä muutamia ihmisiä, joita ilman se tuskin olisi vieläkään valmis.

Ensiksi haluan kiittää kaikkia kärsivällisyydestä työn viivästymisen suhteen. Valvojalleni Henrik Haggrénille kiitokset myös monista fotogrammetrian luennoista vuosien aikana. Kiitokset ohjaajilleni Petri Rönnholmille, joka auttoi ymmärtämään monia fotogrammetrisia pulmia, ja Risto Ilvekselle, joka antoi hyviä neuvoja käytännön kokeisiin.

Työ tehtiin yhteistyössä Maanmittauslaitoksen Ilmakuvakeskuksen kanssa ja haluankin kiittää kaikkia työntekijöitä avusta työtä tehdessä ja mukavasta työporukasta heti ensimmäisestä kesätyöpäivästäni lähtien. Erityiskiitos Jyrki Lämsälle, joka käytännössä toimi diplomityön kolmantena ohjaajana.

Lopuksi kiitokset ystävilleni, isälleni ja äidilleni, jotka kannustivat minua eteenpäin ja puhuivat minulle järkeä, kun sitä tarvitsin.

Otaniemi, 26.5.2014

Jesper Rantanen

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Tutkimuksen tausta	4
2.1 Fotogrammetrisia perusteita	4
2.2 Stereomallien vääristymät	8
2.3 Ilmakuvausprosessi ja sen virhelähteet	13
2.3.1 Ilmakolmiointi	13
2.3.2 Ilmakolmioinnin tarkkuus	14
2.3.3 Ilmakuvatuotanto Maanmittauslaitoksessa	15
2.4 Fotogrammetriset pintamallit	15
2.4.1 Paikalliset menetelmät	17
2.4.2 Globaali yhteensovitus	18
2.4.3 Semi-globaali yhteensovitus	19
2.5 Laserkeilaus	20
2.5.1 Peruseriaate ja tekniikka	20
2.5.2 Laserkeilausjärjestelmä	22
2.5.3 Uusi valtakunnallinen korkeusmalli	22
2.5.4 Laserkeilauksen virhelähteet	25
2.6 Fotogrammetrisen- ja laserkeilauspintamallin erot	28
3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät	29
3.1 Aineisto	29
3.2 Fotogrammetrisen pintamallin muodostaminen	31
3.3 Testit	32
3.3.1 Laserkeilauspintamallin muodostamisen eri vaihtoehdot ja sen vertailu fotogrammetriseen pintamalliin	32
3.3.2 Metsä ja pelto	34
3.3.3 Orientointivirheen löytäminen pintojen erotuksesta	36
3.3.4 Menetelmän ajankäytön mittaaminen	36
4 Tulokset	38
4.1 Laserkeilauspintamallin vertailu fotogrammetriseen pintamalliin . . .	38
4.2 Metsä ja pelto	42

4.3	Orientointivirheen löytäminen pintojen erotuksesta	48
4.4	Ajankäytön mittaaminen	55
5	Johtopäätökset	56

Symbolit ja lyhenteet

Lyhenteet

GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSD	Ground Sampling Distance
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
KM10	Korkeusmalli 10 m (Vanha valtakunnallinen korkeusmalli)
KM2	Korkeusmalli 2 m (Uusi valtakunnallinen korkeusmalli)
RMSE	Root Mean Square Error
SGM	Semi-Global Matching
TIN	Triangulated Irregular Network

1 Johdanto

Ilmakolmiointi on menetelmä, jolla määritetään ilmakuvajoukon sijainti- ja asennotiedot eli orientoinnit. Joukko ilmakuvia liitetään toisiinsa useammalla kuvalla erottuvien liitospisteiden ja muutaman sijainniltaan tunnetun kiintopisteen avulla. Tämän jälkeen kuvien orientointi toistensa ja ulkoisen maastokoordinaatiston suhteen voidaan ratkaista. Liitospisteiden sijaintia ei tarvitse tuntea vaan ne ratkaistaan osana tasoituslaskua. Ilmakolmiointia käytetään kartoituksessa suurilla ilmakuvajoukoilla. Kolmioituja kuvia voidaan käyttää maastokartoituksessa ja saman maa-alueen kattavat kuvat voidaan oikaista stereokuvauksen normaalitapaukseen, jolloin niitä voi tarkastella kolmiulotteisena. Koska stereokuvista voidaan ratkaista kuvapisteen kolmiulotteiset koordinaatit maastossa, niillä voidaan luoda maastonpintamalleja ja korkeusmalleja. Tässä tutkimuksessa käytettiin pintamalleja, jotka sisältävät maanpinnan lisäksi puut ja rakennukset. Korkeusmalleissa nämä on poistettu ja vain maaston korkeus on jäljellä.

Maanmittauslaitos tuottaa nykyään uutta valtakunnallista korkeusmallia laserkeilaamalla. Laserkeilain on tutkan kaltainen laite, jolla voidaan mitata etäisyys kohteeseen, mutta se toimii radioaaltojen sijasta näkyvän- tai lähi-infrapunavalon aallonpituudella. Nykyiset ilmalaserkeilaimet voivat mitata jopa puoli miljoonaa etäisyshavaintoa sekunnissa ja tuottaa tehokkaasti kolmiulotteisen pistepilven kohteesta. Digitalisten ilmakuvakameroiden ja kuvien yhteensovitusmenetelmien kehitys on kuitenkin mahdollistanut jo maanpintamallien tuottamista pelikstä ilmakuvilta automaattisesti (Haala 2011).

Laserkeilauksella on ilmakuvauksesta riippumattomana prosessina mahdollisuus varmistaa ilmakuvauksen laatu. Jos ilmakolmioiduista kuvista valmistetaan fotogrammetrisesti maastonpintamalli, tätä voidaan verrata laserkeilattuun pintamalliin. Jos aineistot ovat absoluuttisesti tarkkoja, niiden välillä pitäisi teoriassa olla vain pieni ero.

Esimerkiksi Vinni (2010) on tutkinut tätä diplomityössään vertaamalla vanhaa fotogrammetrisesti mitattua KM10 valtakunnallista korkeusmallia ja uutta laserkeilattua KM2 korkeusmallia. Samassa työssä hän myös tutki ilmakolmiointin virheiden vaikutusta stereomittaukseen ja totesi, että kahden kuvan orientoinneissa olevien virheiden vaikutus stereomallin vääristymiseen pystysuunnassa noudattaa likimain virheiden teoriaa.

Tässä työssä selvitetään ilmakolmiointin tarkkuutta käyttämällä hyväksi pintamallin automaattista luomista stereokuvista ja laserkeilauspintamallia. Työ tehdään yhteistyössä Maanmittauslaitoksen ilmakuvakeskuksen kanssa ja käyttämällä heidän tuottamaansa aineistoa. Onnistuessaan tutkimuksen menetelmää voidaan käyttää jatkossa parempaan ilmakuvauksen laadunvalvontaan. Työssä pyritään vastaamaan kolmeen kysymykseen:

1. Millaisilla alueilla ja millaisilla algoritmeilla ilmakuvista ja laserkeilausaineistosta saadaan tuotettua toisiaan vastaavat pintamallit?
2. Onko Maanmittauslaitoksen aineiston stereomalleista tehdyissä pintamalleissa ja laserkeilausmalleissa eroja ja miten suuria erot ovat?
3. Paljonko aikaa laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin vertailuun kuluu?

Ensimmäinen tavoite on vastata siihen, miten ilmakuviste luotu stereomalli muutetaan automaattisesti kolmiulotteiseksi pintamalliksi (fotogrammetrinen pintamalli), jotta ilmakuvia ja laserkeilausaineistoa voidaan verrata keskenään. Mahdollisia algoritmeja kuvasovitukseen ja pintamallin muodostamiseen on useita. Oletettavasti kaikki algoritmit eivät toimi yhtä hyvin, ja lisäksi pintamallin muodostaminen toiminee vain tietynlaisilla maa-alueilla.

Toinen tavoite on käyttää automaattisesti muodostettua fotogrammetrista pintamallia ja laserkeilattua pintamallia ja verrata näitä kahta mallia toisiinsa. Jos mallien ero on hyvin pieni eli ne sopivat toisiinsa, molemmat pintamallit ovat hyvin todennäköisesti tarkkoja, joten niiden tuotantoprosessissakaan (erityisesti ilmakolmioidinnissa) ei ole suuria virheitä. Jos eroa on, jossain kohtaa prosessia on todennäköisesti virhe, joka muuttaa toista pintamallia. Tämän jälkeen on vielä pohdittava, voidaan-ko tästä erosta päätellä, että ilmakolmioidinnissa on virhe, joka vaikuttaa yhden tai useamman kuvan orientointiparametreihin.

Viimeinen tavoite on selvittää menetelmän ajankäyttö, ja arvioida miten helppo se on toistaa suurelle määrälle malleja. Jatkossa menetelmää voitaisiin käyttää osana ilmakuvatuotantoprosessia, jos sen ajankäyttö on riittävän pieni.

Työssä ei puututa siihen, mikä mahdollisesti löydettävät virheet on aiheuttanut. Tähän voidaan perehtyä myöhemmissä tutkimuksissa, mikäli virhettä on. Tässä tutkimuksessa tavoitteena on ainoastaan saada jokin mitta nykyiselle tarkkuudelle. Työssä ei myöskään käsitellä fotogrammetrisen pintamallin muodostamista käsin mittaamalla, koska se on hyvin aikaa vievää työtä ja nykyisin on olemassa useita automaattisia algoritmeja.

Toisessa luvussa käsitellään tutkimuksen teoreettinen tausta. Luvussa paneudutaan erityisesti fotogrammetrisen pintamallin muodostamiseen automaattisesti. Tähän on olemassa useita algoritmeja, joista esitellään muutama. Lisäksi käsitellään ilmakuvaus- ja laserkeilausprosesseja Maanmittauslaitoksessa, aineistojen tarkkuutta ja mahdollisia virhelähteitä.

Kolmannessa luvussa esitellään menetelmät ja aineisto, joilla tutkimus tehdään. Aineistona käytetään maanmittauslaitoksen ilmakuvaus- ja laserkeilausdataa. Menetelmissä käsitellään fotogrammetrisen pintamallin muodostaminen, sen vertaaminen laserkeilattuun pintamalliin ja kaikkien työvaiheiden ajankäytön määrittäminen.

Neljännessä luvussa esitellään tulokset. Viidennessä ja viimeisessä luvussa vastataan yllä esitettyihin kysymyksiin ja arvioidaan, voidaanko kuvattua menetelmää jatkossa käyttää ilmakolmioinnin parempaan laadunvalvontaan.

2 Tutkimuksen tausta

Tässä luvussa käsitellään työn kannalta olennaista teoriaa ja aikaisempaa tutkimusta. Aluksi käsiteltävät fotogrammetriset perusteet ovat alan perusasioita, mutta hyvin olennaisia tutkimuksen kannalta. Esitetyillä periaatteilla voidaan ratkaista valokuvilta kohteen kolmiulotteinen muoto, jos kuvia on riittävästi eri suunnista. Seuraavaksi käsitellään ilmakuvasta ja ilmakolmiointia. Tässä käydään läpi myös ilmakuvausprosessi Maanmittauslaitoksessa, koska siellä on tuotettu tutkimuksessa käytettävä aineisto. Seuraavaksi käsitellään fotogrammetrisia pintamalleja eli kolmiulotteisen mallin muodostamista valokuvilta automaattisesti. Tässä käsitellään uusimmat käytetyt menetelmät. Viimeiseksi käsitellään laserkeilausta ja sen avulla tuotettavaa uutta valtakunnallista korkeusmallia.

2.1 Fotogrammetrisia perusteita

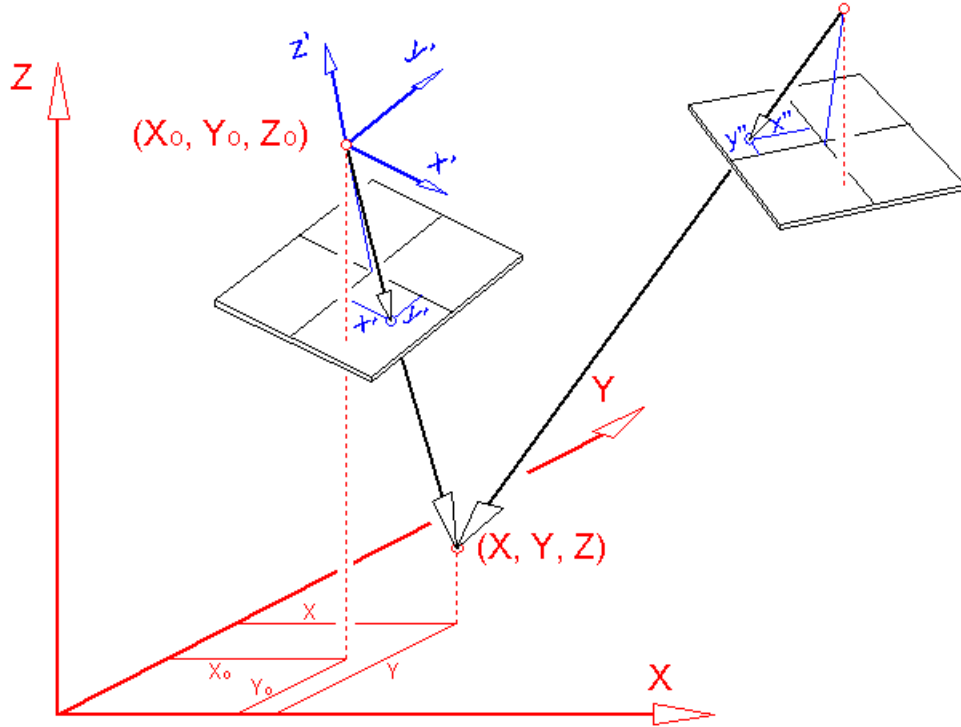
Fotogrammetria on kohteen koon ja muodon mittaamista valokuvilta. Kolmiulotteisia mittoja on mahdollista ratkaista kaksiulotteisilta kuvilta, jos kuvia on useita. Seuraavassa tarvitaan kahta koordinaatistoa: kamera- ja kohdekoordinaatistoa. Kamerakoordinaatiston suunta ja sijainti riippuu kamerasta kuvanottohetkellä. Origo on kameran projektiokeskuksessa, xy -taso on kuvatason suuntainen ja koordinaatiston z -akseli osoittaa kuvanottosuunnasta poispäin. Projektiokeskus vastaa kameran polttopistettä, jos kamera on fokuoitu äärettömyyteen. Pääpiste on projektiokeskuksen projektio kuvatasolle. Kuvalta mitatut koordinaatit ilmoitetaan joko kuva-koordinaateissa $[x, y]^T$ tai kamerakoordinaateissa $[x, y, -c]^T$. kamerakoordinaattien z -koordinaatti on aina $-c$ ja ne ilmoitetaan usein kaksiulotteisina koordinaatteina ilman z -arvoa.

Kohdekoordinaatisto on kameran ulkopuolinen koordinaatisto, jossa kohteen mittoja määritetään – esimerkiksi maastokoordinaatisto. Se voi myös olla jokin mielivaltaisesti valittu mallikoordinaatisto, jos halutaan selvittää vain kohteen muoto, eikä sen absoluuttista sijaintia tai kokoa. Kuvalta mitatun pisteen ja sitä kohteessa vastaavan pisteen koordinaattien välillä vallitsee yhteys, jota kutsutaan kollineaarisuusehdoksi. Ehto perustuu siihen, että kohdepisteen, kuvapisteen ja kameran projektiokeskuksen on sijaittava samalla suoralla. Ehdosta voidaan muodostaa niin kutsutut kollineaarisuusyhtälöt:

$$\begin{cases} x - x_0 = -c \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{12}(Y-Y_0) + r_{13}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \\ y - y_0 = -c \frac{r_{21}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{23}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

Yhtälöissä x ja y ovat kuvapisteen koordinaatit kamerakoordinaatistossa, x_0 ja y_0 kameran pääpisteen paikka kamerakoordinaatistossa (jos muu kuin $(0,0)$), X , Y ja Z

vastaavan kohdepisteen maastokoordinaatit, X_0 , Y_0 ja Z_0 kameran projektiokeskuk-
sen sijainti maastokoordinaatistossa, termit r kamerakoordinaatiston ja maastokoor-
dinaatiston välisen kierron kuvaavan matriisin elementtejä ja c kameravakio. (Inkilä
2012) Koordinaatistojen suhdetta on havainnollistettu kuvassa 1. Kuvan koordinaa-
tit x' , y' , x'' ja y'' vastaavat yhtälöiden 1 koordinaatteja x ja y .



Kuva 1: Eteenpäinleikkaus (Rönnholm ja Haggrén 2005). Kuvassa määritetään koh-
depisteen koordinaatit (X, Y, Z) kuvakoordinaattien (x', y') ja (x'', y'') ja kuvien si-
jainti ja asentotietojen avulla. Punainen koordinaatisto on kohdekoordinaatisto. Ka-
merat sijaitsevat sinisten koordinaatistojen origoissa.

Osa parametreista on tunnettava, jotta yhtälöt ratkeavat, mutta yhtälöitä voidaan
käyttää sekä kohdepisteiden koordinaattien tai itse kuvanottopaikan ratkaisemiseen.
Jos halutaan ratkaista kohdepisteen koordinaatit, on kameran sijainti ja sen sisäi-
nen geometria tunnettava. Fotogrammetriassa käytetään termiä kuvan orientointi.
Orientointeja ovat kuvien sisäinen-, ulkoinen-, keskinäinen- ja absoluuttinen orien-
tointi.

Kuvan sisäinen orientointi tarkoittaa kameran sisäisen geometrian määrittämistä.
Usein puhutaan myös kameran kalibroinnista. Siinä ratkaistaan muun muassa ka-
meran kameravakio c ja pääpisteen paikka (x, y) . Lisäksi voidaan määrittää kame-
ran optiikasta johtuvat virheet, jotka vääristävät kuvaa. Ne on usein tarpeen ottaa
huomioon laskennassa.

Ulkoisessa orientoinnissa ratkaistaan kuvanottopaikka ja kuvanottosuunta ulkoises-
sa koordinaatistossa. Kuvanottopaikkaa vastaa kuvan projektiokeskuksen sijainti ja

suuntaa kamerakoordinaatiston ja maastokoordinaatiston väliset kierrot. Kollineaarisuusyhtälöissä nämä on kuvattu termeillä X_0 , Y_0 ja Z_0 ja r_{11} , r_{12} , r_{13} , r_{21} , r_{22} , r_{23} , r_{31} , r_{32} , r_{33} . Ilmakuvauksessa kierto koostuu yleensä kolmesta kierrosta, yhdestä jokaisen kohdekoordinaatiston pääakselin ympäri. Ne kuvataan kiertomatriisilla, jonka koko on 3×3 ja r -termit ovat sen elementtejä ja ne johdetaan kolmesta kiertokulmasta. Yhteensä ratkaistavana on siis kuusi parametria kuvaa kohden: kolme siirtoa ja kolme kiertoa. Ulkoisen orientoinnin ratkaiseminen vaatii tietoa kuvalta mitattujen pisteiden sijainnista ulkoisessa koordinaatistossa.

Kahden kuvan keskinäisessä orientoinnissa näiden sijainti ratkaistaan ainoastaan toistensa suhteen. Periaatteessa ratkaistavana on kahden kuvan ulkoinen orientointi eli kaksitoista parametria. Koska kameroiden keskinäinen sijainti riittää, vain osa parametreista on toisistaan riippumattomia. Voidaan osoittaa, että viisi parametria riittää kahden kuvan keskinäisen orientoinnin määrittämiseen ja loput seitsemän voidaan valita vapaasti asettamalla esimerkiksi toisen kuvan sijainti koordinaatiston origoon, kiertokulmat nolaksi ja koordinaatiston mittakaava valitsemalla yksi kuvien välisen etäisyyden komponenteista (Inkilä 2012).

Absoluuttisessa orientoinnissa fotogrammetrinen malli, joka sisältää vähintään kaksi kuvaa, kiinnitetään ulkopuoliseen koordinaatistoon. Jos kuvien keskinäinen orientointi on tehty, on ratkaistava vielä seitsemän parametria. Jos molemmat kuvat on orientoitu ulkoisesti, myös absoluuttinen orientointi on tehty.

Orientoiduille kuville kollineaarisuusyhtälöistä voidaan ratkaista halutun kohdepisteen sijainti. Koska yhtä kuvahavaintoa vastaa kaksi yhtälöä mutta kohdepisteen sijainnin kuvaa kolme koordinaattia, täytyy havainto tehdä vähintään kahdelta kuvalta. Tätä kohdekoordinaattien määrittystä kuvahavaintojen perusteella kutsutaan fotogrammetriassa eteenpäinleikkaukseksi ja se muodostaa perustan kohteen kolmiulotteisen muodon mittaamiselle. Kahden kuvan tapauksessa käytössä on jo ylimääräistäkin informaatiota, koska yhtälöitä on neljä eli yksi enemmän kuin ratkaistavia parametreja. Koska havainnoissa on virhettä, yhtälöt eivät yleensä ratkea yksikäsitteisesti. Niille voidaan kuitenkin löytää tasoituslaskulla ratkaisu, jossa virhe on "tasoitettu" havaintoihin. Tyypillinen menetelmä on pienimmän neliösumman tasoitus, jonka ratkaisussa havaintojen virheiden neliösumma on mahdollisimman pieni.

Yllä mainitut yhtälöt pätevät vain ideaaliselle keskusprojektiokuvaukselle. Tyypillisesti kuvauksessa ja kuvahavainnoissa on ei-satunnaista virhettä, joka johtuu kamerasta itsestään. Ongelmat voidaan osittain välttää kameran kalibroinnilla. Kalibroinnin tyypillisimmät muodot ovat laboratoriokalibrorinti, testikenttäkalibrointi ja itsekalibrointi. Laboratoriokalibroinnin tekee tyypillisesti kameran valmistaja tehtaalla, koska se edellyttää laitteistoa, jota kuvaajalla ei yleensä ole. Laboratoriokalibroinnista saatavat tulokset kirjataan laitteen kalibrointitodistukseen, joka tyypillisesti sisältää ainakin

- kuvan kehysmerkkien, keskipisteen, autokollimoidun pääpisteen ja symmetriapisteen koordinaatit

- kameravakion
- piirtovirheet.

Testikenttäkalibrointi tarkoittaa, että kameran sisäinen orientointi määritetään kuvaamalla jotain tunnettua kohdetta ja ratkaisemalla se kollineaarisuusyhtälöiden avulla. Kollineaarisuusyhtälöt voidaan laajentaa yhtälössä 1 sisältämään myös kameran sisäisestä orientoinnista johtuvat virheet:

$$\begin{cases} x - x_0 + dx = -c \frac{r_{11}(X-X_0)+r_{12}(Y-Y_0)+r_{13}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0)+r_{32}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} \\ y - y_0 + dy = -c \frac{r_{21}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{23}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0)+r_{32}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} \end{cases} \quad (2)$$

Termit dx ja dy kuvaavat kaikkia sisäisestä orientoinnista johtuvia virheitä. Näiden esittämiseen on sekä fysikaalisia että matemaattisia tapoja. Alla on esitetty esimerkkinä niin kutsuttu Brownin (1971) malli:

$$\begin{cases} x' = x + \bar{x}(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + \dots) + (P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y}) \\ y' = y + \bar{y}(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + \dots) + (2P_1\bar{x}\bar{y} + P_2(r^2 + 2\bar{y}^2)) \end{cases} \quad (3)$$

missä

$$\begin{cases} x' = x + dx \\ y' = y + dy \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \bar{x} = x - x_0 \\ \bar{y} = y - y_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (6)$$

Yhtälöissä 4, 5 ja 6 x' ja y' merkitsevät vääristyneitä kuvakoordinaatteja, \bar{x} ja \bar{y} pääpistekeskisiä koordinaatteja ja r on kuvapisteen etäisyys kuvan pääpisteestä. Yhtälöissä 3 oletetaan, että kuvan pääpiste on myös vääristymän keskipiste. Vääristymän suuruus riippuu kuvapisteen etäisyydestä pääpisteestä ja yleensä virheet kasvavat kuvan laitaa kohti mentäessä. Parametrit K ja P kuvaavat radiaalisen ja tangentialisen piirtovirheen. Käytettävien termien määrä riippuu siitä, kuinka tarkasti korjaus halutaan määrittää; eri tyyppiset linssit vaativat eri määrän korjaustermejä. Tangentialisen piirtovirheen lisätermi (P_3, P_4 jne.) on jätetty esittämättä, koska ne ovat yleensä hyvin pieniä.

Kolmas tapa tehdä kalibrointiä on itsekalibrointi, jossa kalibrointi tehdään osana ennalta tuntemattoman alueen kuvausta. Kameran sisäisen orientoinnin virheet määritetään osana tasoitusta. Tämä on muuten sama menetelmä kuin testikenttäkalibrointi mutta nyt (suurinta osaa) kohdepisteitä $[X, Y, Z]^T$ ei tunneta ennalta. Joitain kohdekoordinaatteja on tunnettava, jotta kuvaus voidaan sitoa ulkoiseen koordinaatistoon. Lisäksi kaikille tasoituslaskussa määritettäville parametreille on annettava lähtölikiarvot, koska ratkaisu joudutaan tekemään iteratiivisesti.

Ilmakuvauksessa voidaan käyttää hyödyksi sekä laboratoriokalibrointiä, testikenttäkalibrointiä että itsekalibrointiä. Tyypillisesti ilmakuvakamerat ovat valmistajiensa

kalibroimia mutta niille tehdään lisäksi testikenttäkalibrointi ja jokaisen kuvauksen yhteydessä arvoille voidaan laskea parannusta itsekalibrointina.

2.2 Stereomallien vääristymät

Mikäli kuvien orientoinnissa on virhettä, se siirtyy stereomallissa kuvapisteen sijaintitarkkuuteen. Yllä kuvatuissa kollineaarisuusyhtälöissä (kaava 2) on kuitenkin hyvin paljon muuttujia, joten orientointivirheiden vaikutusta on hyvin vaikea hahmottaa pelkästään näiden kautta. Tilannetta voidaan kuitenkin tarkastella helposti niin kutsutussa stereokuvauksen normaalitapauksessa. Kun stereokuvauksen normaalitapauksessa olevia kuvia katsellaan siten, että toinen silmä näkee toisen kuvan ja toinen toisen kuvan, kuvassa syntyy syvyysvaikutelma.

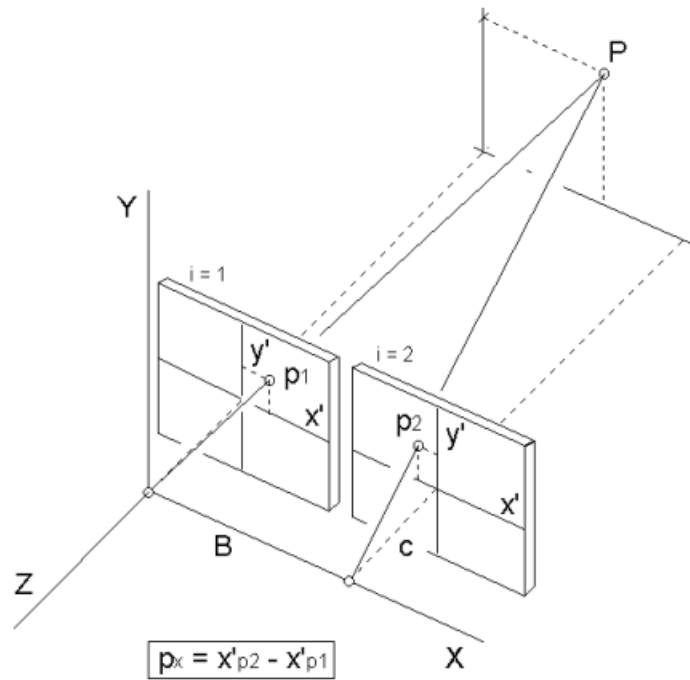
Stereokuvauksen normaalitapauksessa molempien kuvien kuvanottosuunta on sama, kuvatasot ovat samassa tasossa ja projektiokeskukset ovat yhdellä vaakasuoralla. Toisin sanoen, kuvat ovat vierekkäiset. Jos kuville määritetään keskinäinen koordinaatisto kuvan $i = 1$ kamerakoordinaatistossa, jossa kuvan 1 projektiokeskus sijaitsee origossa, kuvan $i = 2$ projektiokeskuksen koordinaatit ovat $[X, 0, 0]^T$. Etäisyyttä X merkitään tyypillisesti B :llä ja sitä kutsutaan kuvakannaksi. Tilannetta on havainnollistettu alla kuvassa 2. Kohdepisteen kuvakoordinaatti y on molemmilla kuvilla sama ($y'_{p1} = y'_{p2}$) eli stereokuvan pystyparallaksi on nolla. Kuvakoordinaattien x'_{p2} ja x'_{p1} erotusta p_x kutsutaan vaakaparallaksiksi.

Kun ainoa ero kameroiden keskinäisessä orientoinnissa on siirto yhdessä suunnassa ja kohdekoordinaatistiksi valitaan vielä sama koordinaatisto, kollineaarisuusyhtälöistä voidaan helposti mitata etäisyys kameroista kohteeseen. Yhtälöistä 1 voidaan ratkaista kohdepisteen etäisyys (Z) kuvatasoon:

$$Z = \frac{B * c}{p_x} \quad (7)$$

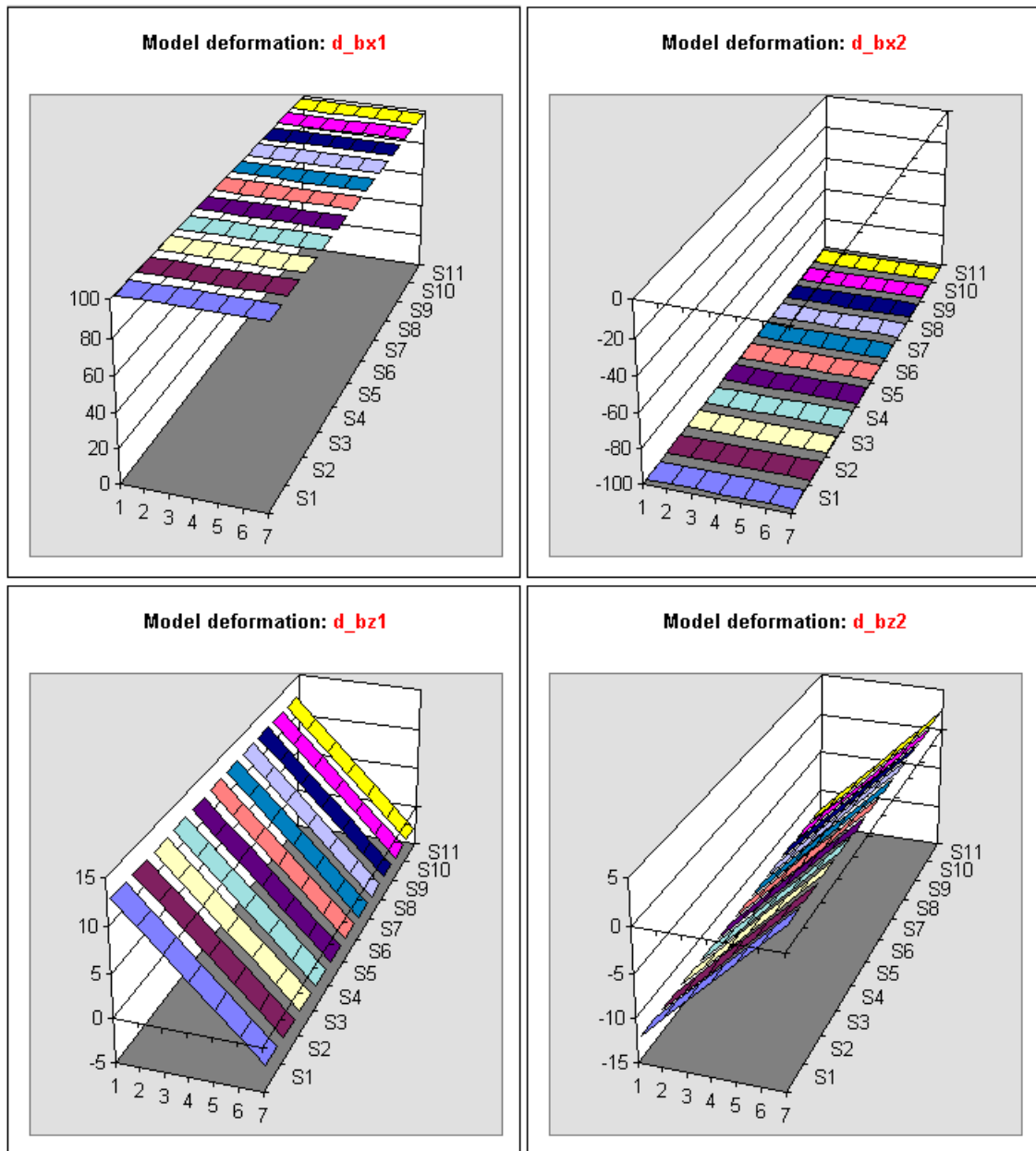
B on kuvakanta, eli kuvien välinen etäisyys, c on kameravakio ja $p_x = x'_{p2} - x'_{p1}$ on vaakaparallaksi. Koordinaatti y' puuttuu kokonaan yhtälöstä, koska kuvapisteen pystykoordinaattien pitäisi olla yhtä suuret. Tämä perustuu koplanariteettiehtoon, jonka mukaan kuvakanta, kuvapistet ja kohdepiste sijaitsevat kaikki samassa tasossa. Jos näin ei ole, ei olla enää stereokuvauksen normaalitapauksessa ja havainnoissa voi mahdollisesti olla pystyparallaksia.

Kun kuvien orientointiin lisätään virhettä eli toista kuvaa siirretään tai kierretään, vaikutus siirtyy etäisyyksimitaukseen. Jos oletetaan, että kyseessä on stereokuvauksen normaalitapaus virheestä huolimatta, virheen suuruus riippuu siitä, paljonko virhe muuttaa mitattua vaakaparallaksia.



Kuva 2: Stereokuvauksen normaalitapaus (Rönnholm ja Haggrén 2005). Kohdepiste on kuvattu kahdella kuvalla, jotka on otettu siten, että kuvaussuunnat ovat samansuuntaiset ja kuvat samassa tasossa.

Kun toista kuvaa siirretään x-suunnassa, virhe siirtyy suoraan etäisyyteen. Tätä voidaan ajatella tilanteena, jossa kuvakanta kasvaa. Jos kaavaa 7 derivoidaan B:n suhteen saadaan tulos $dZ/dB = c/p_x$ eli virhe siirtyy korkeusmittaukseen kerrottuna arvolla c/p_x .



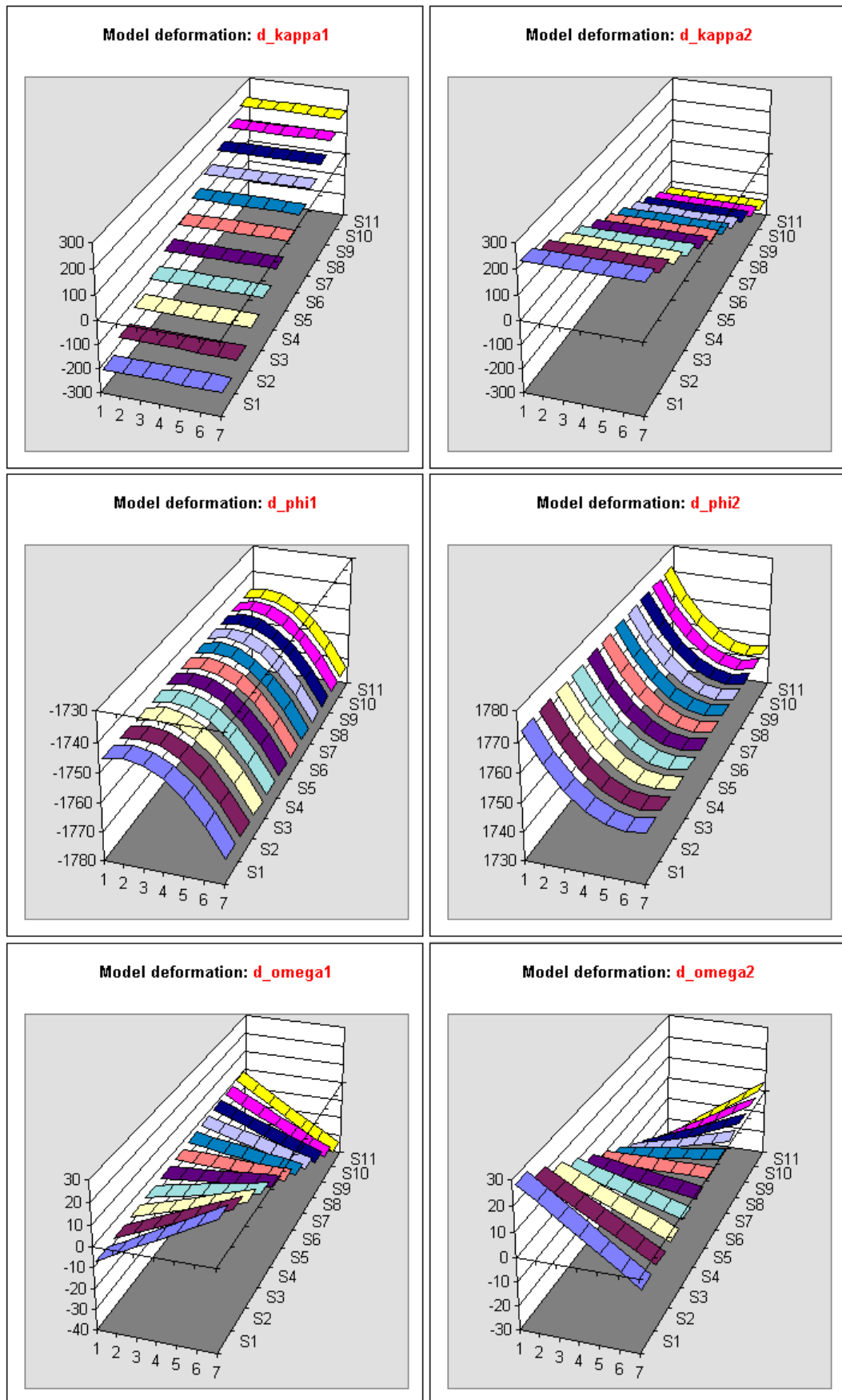
Kuva 3: Kuvien keskinäisen orientoinnin virheiden vaikutus siirtojen tapauksessa. Kuvaajat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas ovat siirto X-suunnassa kohti kuvaparia, siirto X-suunnassa pois kuvaparista, siirto Z-suunnassa kohti kohdetta ja siirto Z-suunnassa pois päin kohteesta. Akseli, jonka yksiköt ovat välillä $[1, 7]$ merkitsee pisteen sijaintia kuvalla X-suunnassa. Akseli, jonka yksiköt ovat välillä $[S1, S11]$ merkitsee sijaintia Y-suunnassa. Viimeinen (korkeus-) akseli kuvaa kuvapisteen etäisyyden virhettä (eli mallin deformaatiota) sen kuvapisteiden sijainnin funktiona. (Haggrén 2003)

Jos virhe on siirrossa muuhun kuin X-suuntaan tai toinen kuvista on kiertynyt, kuvaus ei ole enää stereokuvauksen normaalitapaus. Jos kuitenkin käytetään yhtälöä 7

etäisyyden mittaamiseen, saadaan tuloksia, joihin virheet vaikuttavat hieman toisella tavalla. Haggrén (2003) on laatinut tilannetta havainnollistavia teoreettisia mittaauksia, jossa tasomaisen kohteen geometriaa on mitattu erilaisilla keinotekoisella virheellä kuvien orientointiin. Kuvassa 3 on esitetty X ja Z kooridinaattien orientointivirheen vaikutus etäisyysmittaukseen. (Haggrén 2003) Siirto X-suunnassa nostaa tai laskee etäisyyttä yllä kuvatulla tavalla.

Siirtoa Y-suunnassa ei ole kuvattu, koska teoriassa tämä ei vaikuta vaakaparallaksiin eikä siten etäisyysmittaukseen. Tämä kuitenkin aiheuttaa pystyparallaksia, joka saattaa tehdä etäisyysmittauksen hankalaksi tai mahdottomaksi. Kun ihminen katselee kuvaa stereona, pystyparallaksi vaikeuttaa vastinpisteiden sovittamista yhteen. Samalla tavalla tietokoneen tulkitessa stereokuvaa automaattisesti, pystyparallaksi saattaa siirtää kohteen vastinpisteen toisella kuvalla niin kauas Y-suunnassa, että automaattiset kuvasovitusalgoritmit eivät enää löydä vastinpisteitä.

Siirto Z-suunnassa ei siirry suoraan etäisyyteen, koska etäisyyttä ei mitata varsinaiseen kuvatasoon vaan oletettuun tasoon, jossa molemmat kuvat sijaitsevat. Siirto Z-akselilla ikään kuin suurentaa toista kuvaa toiseen nähden. Tällöin kuvapisteen siirtyvät kuvan toisella (vastinkuvan puoleisella) puolella kohti vastinkuvaa ja toisella puolella pois päin vastinkuvasta, mikä aiheuttaa siirron korkeudessa. Samalla tavalla kuvan yläosassa syntyy positiivista pystyparallaksia ja alaosassa negatiivista pystyparallaksia, jotka voivat vaikeuttaa stereomittausta, mutta eivät suoraan vaikuta etäisyysmittaukseen, mistä syystä kohteen ylä- ja alaosan välillä ei tässä kuvassa ole eroa.



Kuva 4: Kuvien keskinäisen orientoinnin¹²virheiden vaikutus mallin deformaatioon kiertojen tapauksessa kuvapisteen sijainnin funktiona. Kuvaajat ylhäältä alas ovat kierto Z-akselin ympäri (positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan), Y-akselin ympäri ja X-akselin ympäri. (Haggrén 2003)

Kuvan kierto aiheuttaa vaikutusta, jota ei ole yhtä yksinkertaista nähdä. Olennaisista kuitenkin on se, miten paljon kierto lisää tai vähentää vaakaparallaksia, koska silloin syntyy muutoksia, jotka siirtyvät etäisyysmittaukseen. Kuvassa 4 on kuvattu kiertojen omega, fii ja kappa vaikutus, kun nämä ovat kiertoja X-, Y- ja Z-akselien ympäri. Kierrot aiheuttavat myös pystyparallaksia, mutta se on tässä teoreettisessa tapauksessa jätetty käsittelemättä, kuten siirtojenkin tapauksessa.

2.3 Ilmakuvausprosessi ja sen virhelähteet

2.3.1 Ilmakolmiointi

Ilmakuvien keskinäisten orientointien ratkaisemisen edellytyksenä on, että kuva-alueet peittävät toisiaan riittävästi, jotta niiltä voidaan löytää riittävä määrä liitospisteitä. Kuvajonon peräkkäiset kuvat peittävät toisistaan yleensä vähintään 60 % (pituuspeitto), koska halutaan varmistua siitä, että jokainen kohde näkyy vähintään kahdella kuvalla, jotta stereomallit voidaan muodostaa. Lisäksi, että kuvausjonot voidaan liittää toisiinsa, täytyy vierekkäisten kuvausjonojen peittää toisiaan jonkin verran – yleensä noin 30 % (sivupeatto).

Tyypillinen ilmakuvausprosessi käyttää ilmakolmioinniksi kutsuttua menetelmää (kutsutaan myös sädekimppukolmioinniksi) kuvien keskinäisten ja absoluuttisten orientointien ratkaisemiseen. Ilmakuvajoukko kytketään toisiinsa liitospisteillä, jotka ovat useammalla kuvalla erottuvia kohtia. Liitospisteiden koordinaatit, kuvanottoapaikkojen ulkoiset orientoinnit ja mahdolliset kalibrointiparametrit ratkaistaan samanaikaisesti yhteistasoituksena. Malli orientoidaan absoluuttisesti kiintopisteillä, jotka ovat maastossa mitattuja ja signaloituja koordinaattipisteitä. Kaikkien kuvien orientointien laskenta tapahtuu yhtenä joukkona eli blokkina ja laskennassa käytetään tasoituskua.

Tukipisteet ovat maastossa mitattuja kohtia, joiden sijainti tiedetään tarkasti. Näiden avulla ilmakuvat sidotaan ulkoiseen koordinaatistoon ja kaikkien kuvanottoapaikkojen ja liitospisteiden sijainti on mahdollista ratkaista. Pisteet on signaloitava, jotta ne on mahdollista erottaa kuvilta. Teoreettinen minimi kiintopisteiden määrälle on kaksi kaikilta koordinaateiltaan tunnettua tukipistettä ja yksi tukipiste, jolta tunnetaan ainakin yksi koordinaatti (Inkilä 2012). Silloin ratkaisun absoluuttista tarkkuutta ei voida kuitenkaan arvioida joten on tarpeen käyttää enemmän tukipisteitä.

Nykyaikaisessa ilmakuvauksessa käytetään apuna myös satelliittipaikannus- ja inertiamittausjärjestelmiä (GNSS/INS, Global Navigation Satellite System / Inertial Navigation System). Kuvien orientointien laskemista pelkästään GNSS/INS järjestelmän sijainti- ja asentohavainnoilla kutsutaan suorapaikannukseksi. Jos taas orientoinnit ratkaistaan ilmakolmioinnilla mutta GNSS/INS havainnot käytetään maas-

tossa olevien tukipisteiden lisänä, kolmiointia kutsutaan on GNSS/INS tuetuksi (tai avustetuksi).

Toisiaan peittävästä kuvista muodostetaan stereoparit, joiden avulla maasto kartoitetaan. Koska kohde näkyy kahdella kuvalla, myös maaston korkeus on mahdollista ratkaista, kuten selitettiin luvussa 2.1.

2.3.2 Ilmakolmioinnin tarkkuus

Ilmakolmioinnin tarkkuus viittaa tässä kaikkien kuvilta mitattavien kohdepisteiden taso- ja korkeustarkkuuteen. Yksittäisten pisteiden mittaaminen tai tasoituslaskun tarkkuuden ja luotettavuuden tunnusluvut eivät kuitenkaan takaa tarkkuutta koko kuvatulla alueella. On mahdollista, että kohdepisteiden tarkkuus on hyvä vain kiinteiden tukipisteiden lähellä.

Alamús ja Kornus (2008) vertailivat digitaalisen kameran eroa vastaavaan analogiseen kameraan. Koska digitaalisen kameran kuvan leveys oli lentosuunnassa pienempi kuin vertailtavan kameran, kohdepisteiden korkeustarkkuus huononi enemmän mitä kauempana kontrollipisteistä oltiin. Tämä kuitenkin voitiin kompensoida GNSS-havainnoilla, jotka estivät virhettä kasvamasta yhtä paljon. Virhe kohdepisteiden korkeudessa oli simuloidussa kolmiointitilanteessa kontrollipisteiden vieressä noin 10 cm sekä testin analogisella- että digitaalisella kameralla ja keskellä noin 40 cm analogisella ja 60 cm digitaalisella kameralla. Kun GPS-havainnot otettiin mukaan tasoitukseen virhe oli kaikissa kohdissa noin 10 cm ja merkittävää eroa alueen reunojen ja keskikohdan välillä ei enää ollut. (Alamús ja Kornus 2008) Suurin syy GNSS/INS järjestelmien käyttöön on juuri se, että kontrollipisteitä tarvitaan huomattavasti vähemmän, kun tarkkuus ei enää merkittävästi huonone mentäessä niistä pois päin.

Mikäli yksittäisen kuvan orientointiparametreissa on kolmioinnin jälkeen virhe, se ei tule esiin tukipisteiden koordinaateissa, jos ne eivät sijaitse kuvalla. Käytännössä virheet yhdellä kuvalla blokissa ovat harvinaisia, koska tasoituslaskussa virhe tyypillisesti siirtyy kaikkiin parametreihin, mutta niitä voisi syntyä esimerkiksi ohjelmistovirheiden vuoksi tai siksi, että lähtötiedoissa on virheellistä dataa. Jotta varmistuttaisiin kolmioinnin laadusta koko kuva-alueella tarvittaisiin jokin globaali menetelmä, joka tarkastelisi tarkkuutta jokaisessa pisteessä. Koska alueet ovat laajoja, menetelmän olisi oltava automaattinen.

Toinen ongelma laadunvalvonnassa on vertausaineiston puute. Tarkasti mitattuja kiintopisteitä on yleensä kuvausalueilla vain muutamia ja ne ovat jo mukana tasoituksessa. Tasoituksen ulkopuolelle voidaan jättää pisteitä tarkistuspisteiksi, mutta näitä ei koskaan voi olla kovin paljon ilman kattavia maastotöitä. Uusia pisteitä voidaan mitata aikaisemmista kuvauksista stereomittauksella, mutta näiden pisteiden tarkkuus riippuu edeltävän ilmakolmioinnin onnistumisesta.

2.3.3 Ilmakuvatuotanto Maanmittauslaitoksessa

Maanmittauslaitoksen Ilmakuvakeskus tilaa ja suorittaa ilmakuvausta sekä käsittelee kuvat kartoitusta varten. Ilmakuvausprosessin tehtävä on suunnitella kuvauksen kiintopisteiden signalointi, ilmakuvaus, kuvauskarttojen ja navigointitiedostojen tuotanto, kuvauksen laadunvalvonta ja GNSS-datan jälkilaskenta (Kupari 2010). Osan kuvauksista suorittaa ulkopuolinen konsulttiyritys. Ilmakuvakeskuksella on käytössä Z/I Imaging DMC (Digital Mapping Camera) kuvausjärjestelmä. Kuvausta on tehty vuodesta 2009 digitaalisesti ja filmikameran käyttö lopetettiin 2010. (Kupari 2010)

Kuvausalueen kattamiseksi stereopeitolla kuvien pituuspeitto on 65 % ja sivupeiton 30 % (± 5 %). Kuvauksen tulee ulottua kuvausalueen ulkopuolelle vähintään 10 % lentokorkeudesta. Maastoresoluutio (GSD, Ground Sampling Distance) on 50 cm tai 30 cm alueesta riippuen. (Kupari 2010) Suurin osa alueista kuvataan 50 cm maastoresoluutiolla ja tarkempaa resoluutiota käytetään lähinnä tiheään rakennetuilla alueilla. Maanmittauslaitoksen kuvauksissa 65 % pituuspeiton vuoksi lähes kaikki kohteet näkyvät kolmella kuvalla, jolloin mahdollisia stereopareja on kolme, ja osa pisteistä näkyy jopa kuudella kuvalla sivupeiton vuoksi. Sivupeiton avulla voidaan laskea, että noin 40 % kuvausalueesta näkyy kuudella kuvalla (riippuen lentojonon määrästä), kun kuvaus ulottuu 10 % kohdealueen ulkopuolelle. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 5.

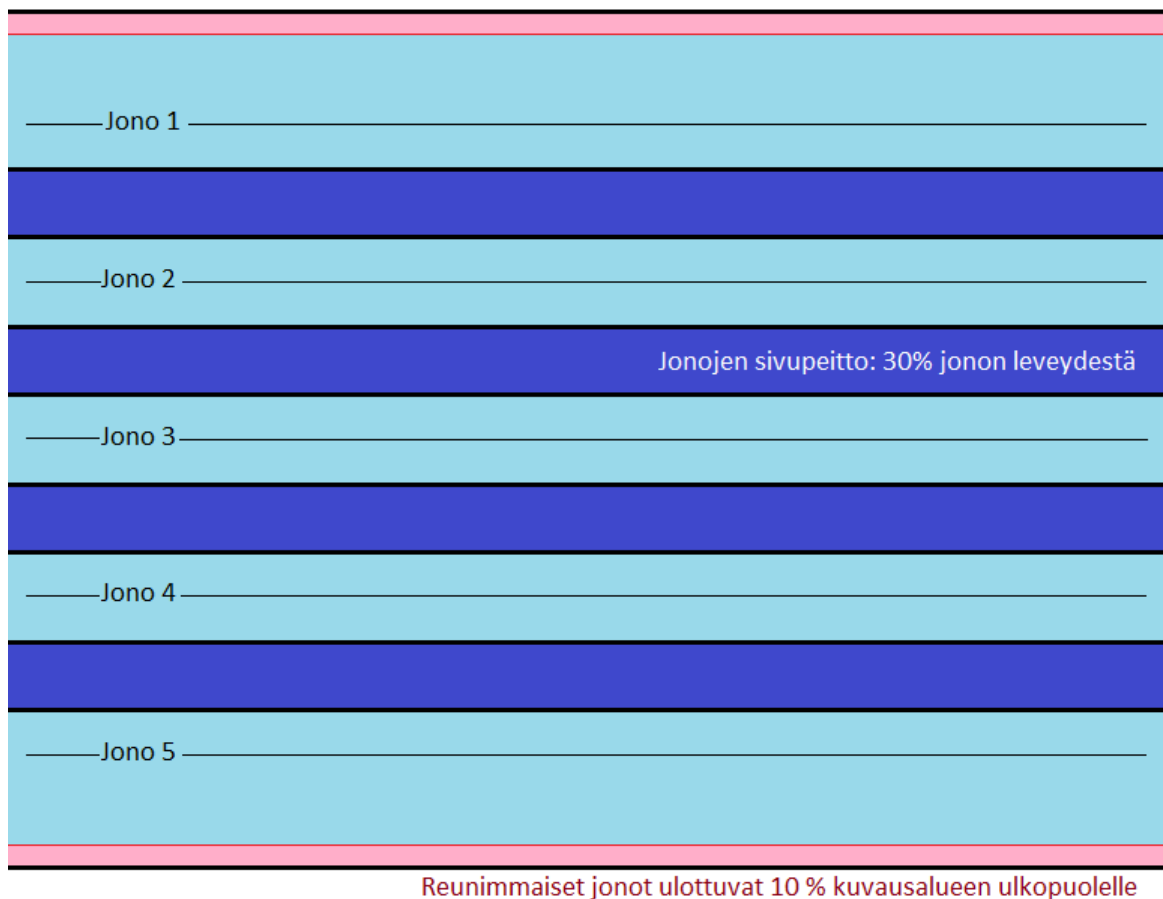
Kuvat ovat nelikanavaisia ja sisältävät punaisen, vihreän ja sinisen kanavan lisäksi lähi-infrapunakanavan. Kuvauksen jälkeen kuvien sävyt säädetään, jolloin värit ovat tasaisemmat koko kuvablokin alueella. Sävyjen säätö tekee lopullisista stereokuvista paremmin tulkittavia.

Ilmakuvakeskuksessa kolmiointi tehdään GNSS/INS avustettuna. Paikannus- ja asentohavaintojen tarkkuus ei yksinään ole riittävä yksinään kuvablokin absoluuttiseen orientointiin, mutta ne antavat kuvanottopaikkojen sijainneille ja kuvanottosuunnille hyvät lähtöarvot ja parantavat lopputulosta.

Kolmiointiin käytetään Maanmittauslaitoksessa LPS Orima -ohjelmistoa. Ohjelma etsii liitospisteet automaattisesti ja laskee kuvien lopulliset orientoinnit GNSS/INS-avustettuna. Liitospisteiden koordinaatit ja kuvan orientointiparametrit ratkaistaan yhtä aikaa blokkitasoituksena. Lisäksi tasoituksessa ratkaistaan itsekaliibrointi, jolla voidaan kompensoida kuvauskohtaisia systemaattisia virheitä.

2.4 Fotogrammetriset pintamallit

Fotogrammetrisella pintamallilla tarkoitetaan tässä kohteen kolmiulotteista pinnanmuotoa, joka mitataan eteenpäinleikkaamalla kahdelta ulkoiselta orientoinniltaan tunnetulta kuvalta, jotka yhdessä muodostavat stereoparin. Tiheimmillään jokaisel-



Kuva 5: Alue, joka näkyy kuudella kuvalla sijaitsee lentolinjojen välissä ja erottuu siksi molemmilla linjoilla. Alue on esitetty kuvassa tummansinisellä.

le kuvapisteelle etsitään vastinpiste toiselta kuvalta. Jos kuvat ovat hyvin suuria ja halutaan tiheä pintamalli, tehtävä on laskennallisesti hyvin raskas.

Maastomallit on tuotettu alunperin tekemällä fotogrammetrisia mittauksia manuaalisesti stereomalleista. Menetelmä on työläs, joten sen sijaan on käytetty muun muassa laserkeilausta. Fotogrammetrisia pintamalleja on kuitenkin mahdollista tuottaa myös automaattisesti. Haala (2009) mainitsee artikkelissaan, miten digitaalisten ilmakuvakameroiden kehittynyt resoluutio ja uudet kuvaliitosalgoritmit kuten Semi-globaali yhteensovitus (SGM, Semi-Global Matching) ovat tehneet fotogrammetrisista pintamalleista mahdollisen vaihtoehdon laserkeilaukselle. Epäilemättä myös tietokoneiden laskentatehon kasvu on vaikuttanut asiaan, koska suurempia kuvatiedostoja voidaan käsitellä nopeammin.

2.4.1 Paikalliset menetelmät

Piirrepohjaiset paikalliset menetelmät perustuvat vastinpiirteiden (esimerkiksi reunojen ja kulmien) löytämiseen kuvalta. Kuvapisteelle voidaan etsiä vastinpiste etsimällä samanlainen piirre vastinkuvalta. Nämä menetelmät soveltuvat kuitenkin huonosti täydellisen pintamallin luomiseen, koska jokaisen pisteen kohdalla ei ole selkeää piirrettä. Aluepohjaiset paikalliset menetelmät tutkivat kuvapistettä ympäröivää aluetta, tyypillisesti muutaman kuvapisteen etäisyydellä. Tätä aluetta verrataan eri paikkoihin vastinkuvalla ja tutkitaan, miten se vastaa toista kuvaa. Vastinpiste löytyy todennäköisimmin kohdasta, jossa samankaltaisuus on suuri. Aluepohjaiset menetelmät eroavat piirrepohjaisista siten, että aluepohjaisessa menetelmässä ei ole merkitystä, onko kuvapistettä ympäröivässä alueessa mitään tunnistettavaa piirrettä.

Yksinkertainen menetelmä on etsiä jokaiselle kuvapisteelle vastinpiste toiselta kuvalta valitsemalla pisteen ympäriltä alue etsintäikkunaksi ja laskemalla tämän ikkunan kirkkausarvojen korrelaatio jokaisessa vastinkuvan mahdollisessa vastinpisteessä. Alueen vertaamiseksi toiseen kuvaan tarvitaan jokin mitta samankaltaisuudelle (engl. similarity measure). Tyypillisimmät ovat intensiteettiarvojen erojen neliöiden summa (SSD, Sum of Squared Differencies) ja absoluuttisten erojen summa (SAD, Sum of Absolute Differencies) (Szeliski 2010).

Aluepohjaisissa menetelmissä on ainakin kaksi ongelmaa: läpikäytävien alueiden määrä vastinkuvalla on yleensä suuri, joten laskenta on hidasta ja menetelmä olettaa, että kuvapistettä ympäröivä alue on saman näköinen kummallakin kuvalla. Jos kohteen ympärillä olevaa etsintäaluetta pienennetään, laskenta-aika lyhenee. Samalla todennäköisyys, että kuvien välillä on suuria muutoksia pisteen ympäristössä, pienenee. Pienet etsintäikkunat johtavat kuitenkin siihen, että pisteitä, joissa korrelaatio on suuri, on enemmän ja karkean virheen mahdollisuus kasvaa. Tämä tapahtuu erityisesti, jos kohteen tekstuuri on toistuva.

Piirre- ja aluepohjaisia menetelmiä voidaan myös yhdistää. Näin on toteutettu ainakin Socet Set ohjelmiston Next Generation Automatic Terrain Extraction -algoritmi (NGATE). Koska ikkunapohjaiset menetelmät onnistuvat huonosti juuri reunojen lähistöllä, näillä alueilla reunapohjainen sovitusta avustaa ikkunapohjaista sovitusta. (BAE Systems 2007) Ohjelman käyttämä algoritmi käyttää myös takaisinsovitusta ja useampaa kuvaparia kerralla (Zhang ym. 2006).

Koska suurin osa kuvapisteistä erottuu tyypillisessä ilmakuvauksessa useammalla kuin kahdella kuvalla, voidaan yhdelle pisteelle etsiä korkeus useammasta kuvaparista. Tällä voidaan mallista poistaa karkeitä virheitä, vaikka se lisääkin laskenta-aikaa. Zhang ym. (2006) tekemässä testissä NGATE:n käyttämällä algoritmilla laskettiin pintamalli kahdessa tapauksessa ja sitä verrattiin operaattorin manuaalisesti mittaamaan pintamalliin. Testissä vertailtiin tuloksia, kun yhden pisteen mittaamiseen käytettiin korkeintaan yhtä kuvaparia tai korkeintaan neljää kuvaparia. RMSE

Taulukko 1: Tutkimuksesta BAE Systems (2007) kerättyjä tuloksia. Arvot esittävät NGATE-sovelluksen algoritmilla automaattisesti laskettujen pintamallien ominaisuuksia ja tarkkuuksia verrattuna manuaalisesti mitattuihin korkeuspisteisiin.

Koe	GSD (m)	DSM (m)	RMSE (m)	Harha (m)	RMSE/GSD	Harha/GSD
1	0.05	0.25	0.18	−0.03	3.60	−0.60
2	0.35	3.00	1.12	−0.28	3.20	−0.80
3	0.25	1.50	0.56	−0.24	2.24	−0.96
4.1	0.15	0.50	0.73	−0.02	4.87	−0.13
4.2	0.15	0.50	0.57	−0.06	3.80	−0.40

oli käytettäessä vain yhtä kuvaparia 2,04 m ja neljää kuvaparia 1,37 m eli noin 33 % pienempi. Laskenta-aika kasvoi noin nelinkertaiseksi käytettäessä neljää kuvaparia.

BAE Systemsin (2007) julkaisussa on esitetty useita tapauksia, jossa on arvioitu menetelmän tarkkuutta. Taulukkoon 1 alle on poimittu näistä ne tulokset, joissa oli verrattu algoritmin tekemää pintamallia samalla alueella tasavälein operaattorin manuaalisesti mittaamiin korkeuspisteisiin. Tähän otettiin tutkimuksista vain ne arvot, joissa oli laskettu kaikkien pisteiden RMSE ilman, että mallista oli poistettu manuaalisesti karkeitä virheitä. Neljännessä tutkimuksessa mukaan otettiin kaksi tapausta: 4.1 ja 4.2. Ensimmäisessä on käsitelty kaikkien manuaalisesti mitattujen pisteiden erotusta fotogrammetriseen malliin ja toisessa puustoon osuneet pisteet on jätetty huomiotta

Taulukossa 1 on ilmakuvien erottelukyky metreissä (GSD), joka vastaa tässä kuvien pikselikokoa, maastomallin ruutukoko metreissä (DSM), RMSE metreissä ja harha eli systemaattinen virhe metreissä. RMSE ja harha on muutettu kahdessa viimeisessä sarakkeessa erottelukyvyn monikerroiksi, jotta kuvauksen maastoresoluution vaikutus poistuu ja tuloksia voidaan verrata toisiinsa. RMSE vaihtelee melko paljon, mutta se on keskimäärin noin 3,5 kertaa erottelukyky (tapausta 4 ilman puita ei otettu huomioon). Harha on kaikissa tapauksissa, joissa se on mainittu, alle erottelukyvyn. Tapauksessa, jossa puihin osuneet tarkistuspisteet jätettiin pois laskennasta, RMSE pieneni noin 22 %. Pisteitä hylättiin 17 kaikkiaan 121 tarkistuspisteestä eli noin 14 %.

2.4.2 Globaali yhteensovitus

Jotta välttyttäisiin ikkunapohjaisten menetelmien ongelmalta, jossa siirtymää ei sallita ikkunan sisällä, ainoa todellinen ratkaisu on sovittaa yksittäisiä pikseleitä toisiinsa ilman ikkunaa. Yksittäiset pikselit eivät kuitenkaan sisällä vielä tarpeeksi informaatiota, jotta jokaiselle löytyisi yksikäsitteinen pari. (Hirschmüller 2008) Tästä syystä globaalit yhteensovitusmenetelmät sisältävät jonkin lisäehdon pintamallin taseisuudesta koko alueella (globaalisti) eli vierekkäisten pikselien siirtymä on lähellä

toisiaan. Szeliski (2010, s. 552) kuvaa kustannustaa yhtälöllä:

$$E(d) = E_d(d) + \lambda E_s(d) \quad (8)$$

missä ensimmäinen termi kuvaa miten hyvin pikselit sopivat vastinpikseleihinsä siirtymällä d , joka siis vastaa stereokuvauksen normaalitapauksessa vaakaparallaksia. Toinen termi

$$E_s(d) = \sum_{(x,y)} \rho(d(x,y) - d(x+1,y)) + \rho(d(x,y) - d(x,y+1)) \quad (9)$$

kuvaa miten vierekkäiset siirtymät suhtautuvat toisiinsa. Rho on aidosti kasvava funktio. Tällöin mitä suurempi siirtymäero vierekkäisillä pikseleillä on sitä suurempi on myös kustannus. (Szeliski 2010, s. 553) Erona paikallisiin ikkunapohjaisiin menetelmiin globaalit menetelmät kuitenkin mahdollistavat epäjatkuvuuskohdat eivätkä oletta, että siirtymäeroa ei pienellä alueella ole.

Globaalin yhteensovituksen ongelma on, että energian minimointi kahdessa ulottuvuudessa (x ja y) on laskennallisesti hyvin raskas tehtävä. Hirschmüller kirjoittaa, että yksi vaihtoehto on ratkaista ongelma vain yhdessä ulottuvuudessa ja optimoida siirtymät vain vaakariveittäin, mikä on mahdollista lyhyemmässä ajassa. Tämä ratkaisu on kuitenkin altis virheille pystysuunnassa (Hirschmüller 2005).

2.4.3 Semi-globaali yhteensovitus

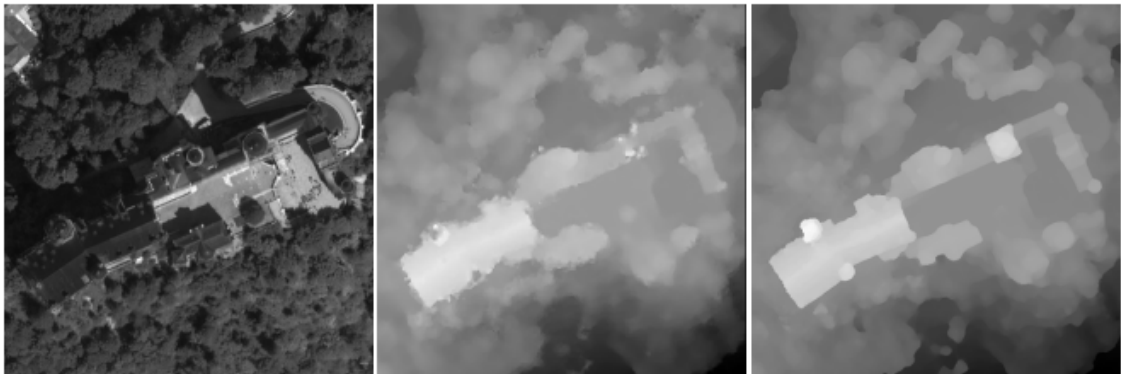
Edellisten ongelmien vuoksi Hirschmüller (2005) on kehittänyt idean uudesta semi-globaalista yhteensovituksesta. Hirschmüller on valinnut globaaliksi tasaisuusehdoksi seuraavan yhtälön:

$$E(D) = \sum_p C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \quad (10)$$

Kaava esittää olennaisesti saman asian kuin yllä oleva kaava 8. D on kuvapisteen siirtymä kuvien välillä, p on kuvapiste (x,y) ja q sen vastinpiste, C kustannusfunktio ja P_1 ja P_2 ovat kustannuksia yhden yksikön siirtymäerolle vierekkäisissä kuvapisteissä ja useamman yksikön siirtymille ($P_2 \geq P_1$). Erona yllä on, että kustannus nousee diskreetisti ja se on sama kaikille yli yhden yksikön siirtymäeroille. Tämä säilyttää myös suuremmat epäjatkuvuuskohdat mallissa. Kuva 6 on Hirschmüllerin (2005) tutkimuksesta ja se näyttää hyvin, miten paljon terävämpiä reunoista tulee Semi-globaalilla yhteensovituksella verrattuna tavalliseen kuvakorrelaatiomenetelmään.

Haala (2011) on käyttänyt tutkimuksessaan fotogrammetrisista pintamalleista Hirschmüllerin semi-globaalia menetelmää. Tutkimuksessa mitattiin erimittaisten kuvakantojen vaikutusta tarkkuuteen. Lisäksi hän tutkii tässä useamman kuvaparin käyttämistä yhden pisteen mittaamiseen. Osoittautuu, että, kun kuvakantaa kasvatetaan,

pintamallin pisteiden tarkkuus paranee, koska suurempi stereovaikutus antaa paremman mittaustarkkuuden. Samaan aikaan kuitenkin kaikille pisteille ei löydy oikeaa vastinpistettä, koska ero kuvien radiometriassa kasvaa kuvakannan kasvaessa ja yhteensovitus muuttuu vaikeammaksi. Parhaisiin tuloksiin päästiin ottamalla useampi kuvapari jokaisen pisteen mittaukseen, jolloin karkeiden virheiden mahdollisuus pienenee. Pintamallista laskettiin koko alueelta keskimääräinen virhe korkeudessa, joka parhaassa tapauksessa oli 2.78 cm ja 91.5% pisteistä löydettiin vastinpiste. Lento- korkeus oli 1600 m ja GSD noin 10 cm. Tutkimus osoittaa, että semi-globaali yhteensovitus on hyvin mahdollinen tapa tuottaa tiheä maastonpintamalli. (Haala 2011) Huomattavaa kuitenkin on, että tämä menetelmä vaatii kuvien suurempaa sivu- ja pituuspeittoa.



Kuva 6: Hirschmüller (2005) tutkimuksessa tehtyjä pintamalleja Neuschwansteinin linnasta. Vasemmalla on ortoilmakuva linnasta, keskellä tavallisella kuvakorrelaatiomenetelmällä tehty pintamalli ja oikealla Semi-globaalilla yhteensovituksella tehty pintamalli.

2.5 Laserkeilaus

2.5.1 Perusperiaate ja tekniikka

Laserkeilaus on tutkan kaltainen menetelmä, joka perustuu lasersäteen heijastumiseen kohteesta. Koska lasersäteen nopeus (eli valonnopeus) on tunnettu, etäisyys kohteeseen voidaan määrittää säteen kulkuajasta (tyypillisellä ilmalaserkeilauskorkeudella säteen kulku-aika on joitain mikrosekunteja). Etäisyyden lisäksi tarkka paikka, josta säde heijastui, voidaan määrittää, kun laserkeilaimen oma sijainti ja säteen lähtösuunta on tunnettu. Kohteen muoto saadaan mitattua, kun näitä suunta- ja etäisyysmittauksia tehdään riittävästi.

Holopainen ym. (2013) mainitsevat, että keilaimet kykenevät jo ainakin puoleen miljoonaan mittaukseen sekunnissa. Laserkeilauksen pulssitiheyttä (mittaustihey-

tä) rajoittaa kuitenkin laitteen toimintanopeuden lisäksi voimakkaasti säteen kulkuaika, koska keilaimet voivat käsitellä vain rajallista määrää pulsseja kerrallaan (Holopainen ym. 2013, s. 17). Tätä voi havainnollistaa laskulla: jos keilattava kohde on kahden kilometrin päässä, säteen kulkuaika kohteeseen ja takaisin on $\frac{4\text{km}}{299792\frac{\text{km}}{\text{s}}} = 0,0000133\dots\text{s}$ eli noin 13 mikrosekuntia. Mittauksia sekunnissa voi siis olla enintään noin 75000 tällä etäisyydellä, jos keilaimen on odotettava ensimmäisen pulssin paluuta, ennen seuraavan lähettämistä.

Uudet laitteet pystyvät kuitenkin joko käsittelemään useita pulsseja samanaikaisesti tai niissä on kahdennettuja järjestelmiä, jotka tekevät mittauksia yhtä aikaa (Holopainen ym. 2013, s. 17). Jos pulsseja voi olla kaksi matkalla yhtä aikaa, mahdollisten mittausten määrä kaksinkertaistuu ja niin edelleen. Mittausten määrä sekunnissa vaikuttaa suoraan lopputuotteena saatavan mallin yksityiskohtaisuuteen. Luvussa 2.5.3 käsitellään maanmittauslaitoksen aineiston pistetiheyttä ja sen vaikutusta.

Tässä käsitellään pulssikeilaimia, koska ilmalaserkeilaimet perustuvat tähän tekniikkaan. Pulssilaserkeilaimet voivat tallentaa joko diskreetin määrän paluukaikuja tai koko pulssin paluukaiun niin kutsutussa ”Full waveform” -muodossa. Tässä tutkimuksessa käytettävä aineisto koostuu diskreeteistä paluupulsseista. Pulssilaserkeilain tallentaa kohteesta heijastuvan lasersäteen kaiun paluuhetken, kun sen voimakkuus ylittää jonkin kynnysarvon. Paluukaikuja voi olla useita lähtenyttä pulssia kohden, koska yksi säde voi heijastua takaisin osittain esimerkiksi puun latvustosta ja osittain vasta maasta. Nykyaikaiset keilaimet osaavat tallentaa nämä pulssit erikseen ja liittää niihin tiedon, monesko kaiku oli kyseessä (ensimmäinen kaiku, välikaiku, viimeinen kaiku tai ainoa kaiku). Tämä on hyödyllistä kartoituksessa esimerkiksi siksi, että maan pinnasta heijastuneiden kaikujen pitäisi olla viimeisiä tai ainoita kaikuja joten muut kaiut voidaan hylätä maanpintamallia luotaessa. Lasersäteen kyky mitata myös puuston läpi onkin tehnyt siitä erityisen hyödyllisen metsäisten alueiden kartoituksessa (Holopainen 2013, s. 13).

Kaiut muodostavat kolmiulotteisen joukon pisteitä, jota kutsutaan laserpistepilveksi. Pisteet kuvaavat niiden paikkojen, joista laserpulssit heijastuivat takaisin, sijaintia maastossa. Aineistot ovat tyypillisesti suuria ja käsittävät miljoonia pisteitä. Pisteitä voidaan luokitella eri luokkiin esimerkiksi sen perusteella, monesko pulssin kaiku on, ja niistä voidaan etsiä vaikkapa maanpinnan pisteitä tai puuston pisteitä. Pelkkä pistepilvi ei välttämättä kerro kohteesta vielä kovin paljon, jos pistetiheys on harva. Aineistosta voidaan kuitenkin muodostaa esimerkiksi kolmioverkkopintamalleja (Triangulated Irregular Network, TIN). Ilmalaserkeilauksen tapauksessa pisteet ovat maaston korkeuspisteitä, jotka tyypillisesti muokataan eteenpäin rasterimalliksi maaston korkeudesta.

2.5.2 Laserkeilausjärjestelmä

Holopainen ym. (2013) kuvaavat laserkeilausjärjestelmää kirjassaan seuraavasti: laserkeilausjärjestelmä koostuu tyypillisesti laserlähettimestä- ja vastaanottimesta, keilaimesta, paikannus- ja asennonhavainnointilaitteistosta ja jalustasta. Laserlähetin lähettää pulssin ja vastaanotin havaitsee heijastuneen pulssin ja mittaa sen paluua-ajan. Nämä kaksi muodostavat yhdessä etäisyysmittarin, kun etäisyys voidaan laskea signaalin kulkuajasta. Keilainosa määrittää pulssin kulkusuunnan ja säätämällä sitä jokaiselle pulssille hieman eri suuntaan saadaan keilattua alue. (Holopainen ym. 2013) Ilmalaserkeilauksessa tyypillisesti muutetaan vain pulssin lähtökulmaa keilaimen (ja lentokoneen) kulkusuuntaan nähden kohtisuorassa.

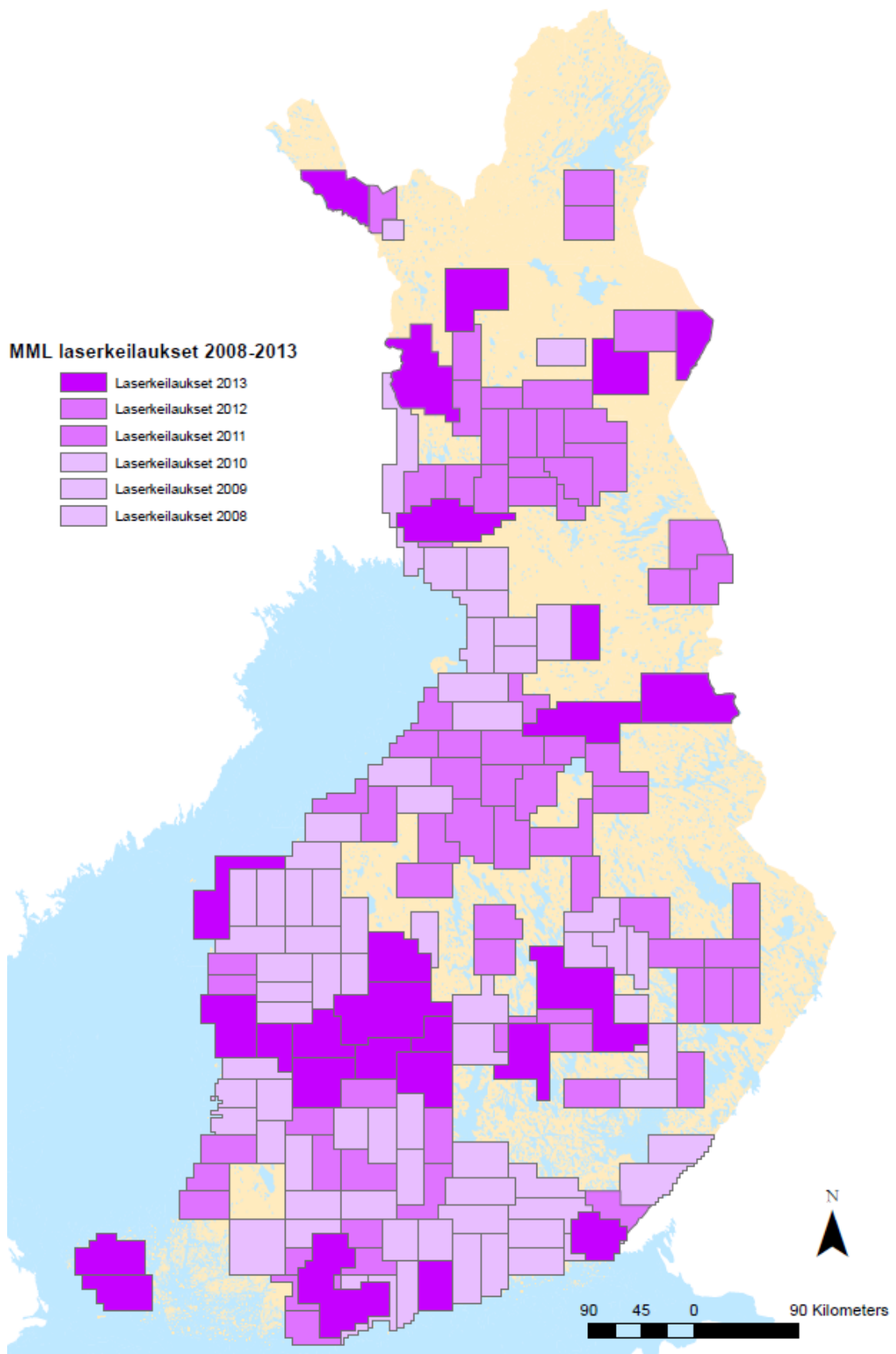
Paikallaan mittaavat maalaserkeilaimet eivät tarvitse omaa paikannus- ja asennonhavainnointilaitteita, koska niiden sijainti tunnetaan tai se voidaan johtaa mittausaineistosta. Ilmalaserkeilauksessa paikannus- ja asennonhavainnointi toimii kuten ilmakuvauksessa. Keilaimen sijainti suhteessa GNSS-laitteeseen tunnetaan tarkasti ja keilaimen asentoa mitataan jatkuvasti. GNSS/INSS- ja lasermittauslaitteiden tiedot yhdistetään toisiinsa mittausten aikaleiman avulla (Holopainen ym. 2013).

2.5.3 Uusi valtakunnallinen korkeusmalli

Maanmittauslaitoksessa tuotetaan uutta valtakunnallista korkeusmallia laserkeilaamalla. Vilhomaa (2010) kirjoittaa korkeusmallin tuotannon alkaneen tarpeesta korvata vanha fotogrammetrisesti tuotettu KM10 korkeusmalli tarkemmalla ja tiheimmällä mallilla. Uusi korkeusmalli on rasterimalli 2 m ruutukoolla ja sen korkeus-tarkkuusvaatimukseksi asetettiin 30 cm. Tässä tarkkuutena on käytetty neliön keskivirhettä (Root Mean Square Error, RMSE). (Vilhomaa 2010) Ahokas ym. (2008) tutkivat vuonna 2006 ja 2007 osana projektin aloitusta tehtyjen testilentojen laserkeilausdataa. He totesivat, että vaadittu korkeustarkkuus myös saavutettiin kaikilla alueen maastotyypeillä. Vanhan KM10 ruutukoko oli 10m ja korkeustarkkuus 1,1 m (Oksanen 2006). Korkeusmallilla tarkoitetaan tässä maan pinnan mallia, johon eivät kuulu esimerkiksi puut tai rakennukset.

Tässä työssä olennaista on myös malliin käytettävän aineiston pistetiheys. Vilho-maan (2010) mukaan Maanmittauslaitoksen käyttämä laserkeilaus suoritetaan siten, että laserpulsseja on vähintään 0,5 neliometriä kohden, mikä tarkoittaa, että pisteet ovat noin 1,4 m etäisyydellä toisistaan. Yksittäisten laserpulssien RMSE on enintään 15 cm. (Vilhomaa 2010) Pistetiheys on kompromissi tuotantokustannusten, tuotantoajan ja aineiston yksityiskohtaisuuden välillä. Suurempi pistetiheys saavutetaan, jos esimerkiksi lennetään matalammalla. Tällöin lentokustannukset kasvavat ja aineiston koon kasvaessa käsittely tietokoneilla hidastuu. Pistetiheys täytyy valita siten, että aineiston minimivaatimukset saavutetaan mahdollisimman pienellä pistetiheydellä.

Valtakunnallisen korkeusmallin tuotanto aloitettiin 2008 ja keilaus on edennyt keskimäärin 40000 km² vuodessa. Suomen pinta-alasta oli vuoden 2013 lopussa keilattu 230000 km². Joitain alueita on jo keilattu kahdesti. Maanmittauslaitoksen tilaamat ja itse tekemät keilaukset on esitetty kuvassa 7. Tätä korkeusmallituotantoon tuotettua laserkeilausaineistoa käytetään myös tämän työn aineistona. Osa Suomesta on vielä keilaamatta tai keilausaineistoa ei oltu kesällä 2013 käsitelty, mikä rajoittaa jonkin verran työssä käytettävien koealueiden sijaintia.



Kuva 7: Valtakunnallista korkeusmallituotantoa varten suoritettut laserkeilaukset. (Maanmittauslaitos 2013)

2.5.4 Laserkeilauksen virhelähteet

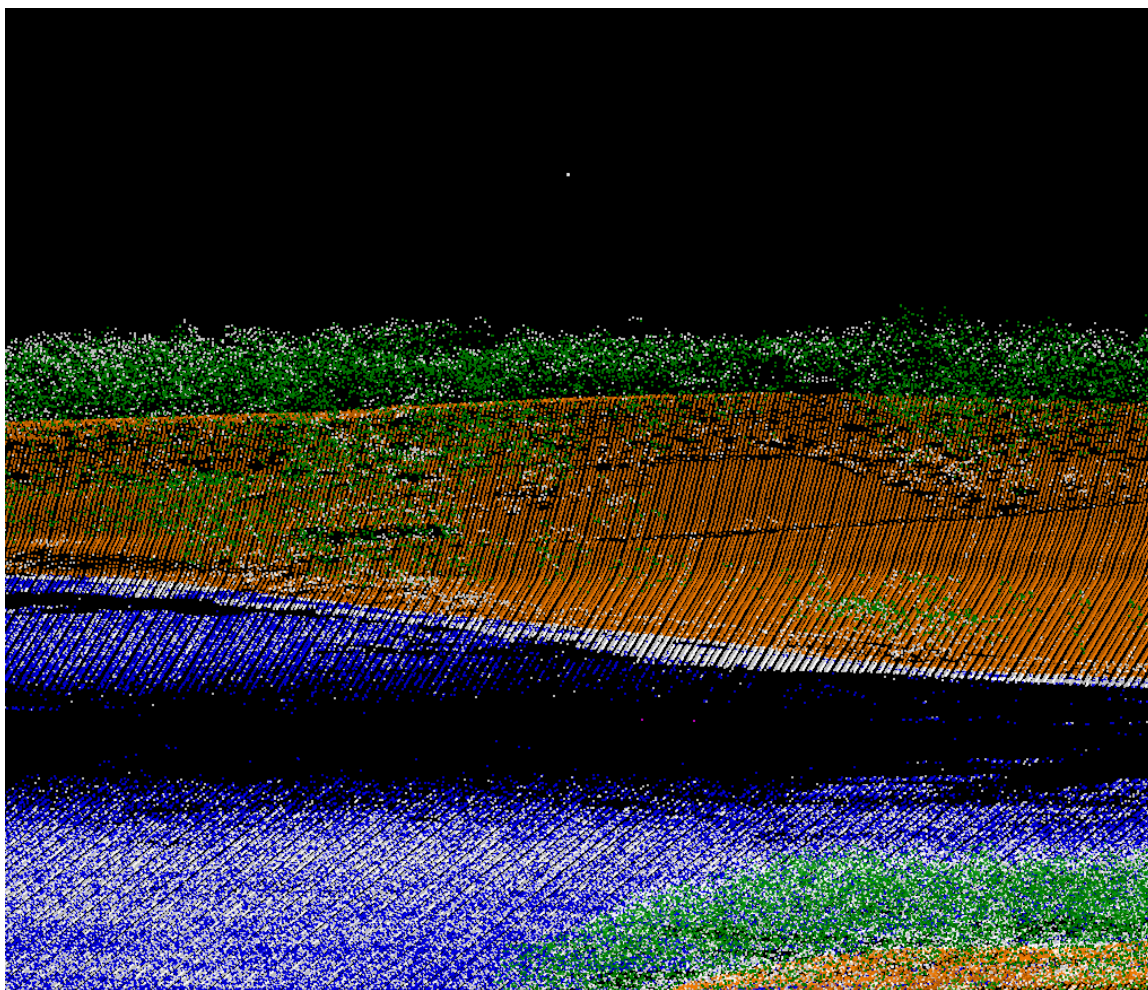
Luvussa 2.5.3 yllä käsiteltiin uuden laserkeilauksella tuotetun korkeusmallin tarkkuutta. Mallissa on satunnaisvirhettä, joka johtuu laserkeilaimen ominaisuuksista kuten sen kyvystä mitata pulssin paluuhetki, pulssin leveydestä, kohteesta ja keilaimen kulmamittaustarkkuudesta. Kuten edellä mainittiin kaikkien näiden virheiden vaikutus pitäisi kuitenkin olla alle 30 cm (Vilhomaa 2010). Lisää virhettä aiheuttaa mallin muodostaminen aineistosta. Koska malli on rasteri, jonka ruutukoko on 2 m, se ei täydellisesti kuvaa maanpinnan pienimpiä yksityiskohtia etenkin, jos korkeuden vaihtelut ovat suuria.

Haikarainen (2008) testasi laserpisteaineistosta luokiteltujen maanpinnan pisteiden ja niistä muodostetun korkeusmallin eroa. Hän laski, millä prosentilla pisteistä virhe oli yli jonkin arvon. Kolmessa testissä 2m ruutukoon korkeusmallilla erot maastomallin ja laserpisteen korkeuden välillä olivat alle 0.30 m 94.83 %, 96.52 % ja 95.23 % pisteistä eli keskimäärin 95.27 % pisteistä. Melko monessa kohtaa korkeusmalli eroaa siis huomattavasti laserpistehavainnoista. Erot olivat kuitenkin alle 0.5 m 98.84 %, 99.08 % ja 98.78 % vastaavissa testeissä eli keskimäärin 98.90 % pisteistä. Yli metrin ero oli vain keskimäärin 0.08 % pisteistä kolmessa testissä, mikä on hyvin pieni osa aineistosta. (Haikarainen 2008) Yli metrin virhepisteet näyttävät osuvan kohdille, joissa korkeus vaihtuu nopeasti, kuten jyrkänteet, ojat ja tien reunat.

Yllä mainittujen virheiden lisäksi aineistossa on kuitenkin myös karkeitä virheitä, jotka eivät johdu laitteen virhetoiminnasta. Tämän työn kannalta ongelmallisimpia ovat ilmapisteet, jotka ovat laserpulssin heijastumia korkealta maasta: esimerkiksi pilvistä, savusta, lentokoneista tai linnuista. Alla olevassa kuvassa 8 on esitetty yksi tällainen piste kuvattuna viistosta laserpisteaineistossa. Tämä valkoinen piste erottuu kuvan ylimpänä. Koska pisteen alapuolella ympäristössä on niukasti muita pisteitä (piste on vesialueella, joista ei aina tule takaisinheijastuksia), se vaikuttaa pisteistöstä tehtävään pintamalliin huomattavasti. Virheen vaikutus näkyy kuvassa 9. Tässä mallissa korkeammat alueet näkyvät vaaleampina. Keskellä muuten tasaista järven pintaa (musta alue) on korkea kumpu kuvan vasemmalla puolella.

Tämä virhe ei ole kuitenkaan vaikuttanut korkeusmallituotantoon, koska pistettä ei ole luokiteltu kuuluvaksi maanpintaan. Aineistosta on automaattisesti luokiteltu maanpinnan pisteet ja tämä luokittelu välttää nopeita korkeuden muutoksia, joten piste ei ole mukana maanpinnassa. Maanpintaan valitut pisteet näkyvät kuvassa 8 oranssin värisenä. Luokittelun tarkoituksena on poistaa mallista virheiden lisäksi muun muassa puut ja rakennukset, jotta vain maanpinta jää jäljelle.

Tässä työssä maanpintaluokittelua ei voida kuitenkaan tehdä. Työn tavoite on verrata fotogrammetrista mallia ja laserkeilausaineistosta muodostettuun pintamalliin, joten maaston korkeusmalli ei ole sopiva, vaan laserkeilausaineistosta tehtävään malliin on jätettävä puut ja rakennukset. Tämän vuoksi myös ilmapisteitä jää aineistoon, koska pisteestä ei ehkä nähdä, onko se heijastunut esimerkiksi korkeasta puusta

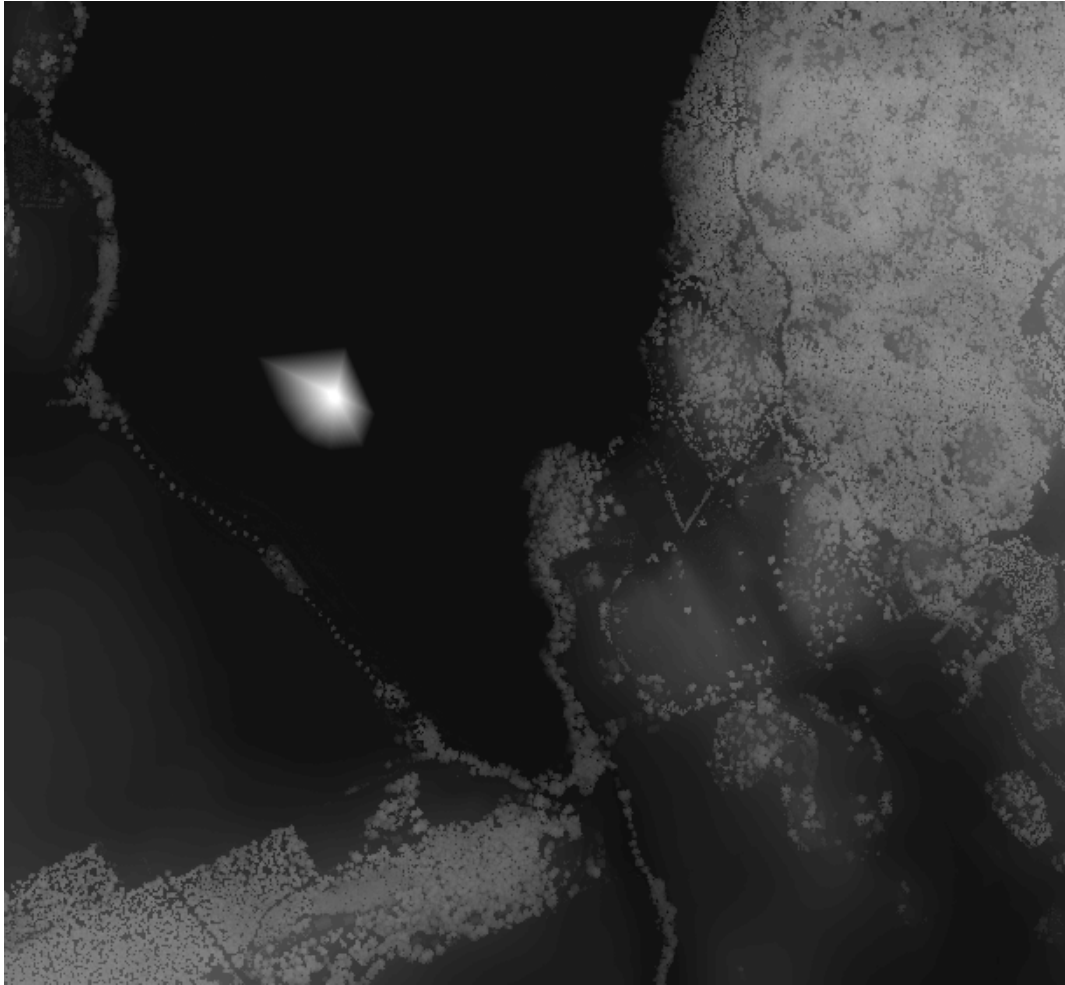


Kuva 8: Kuva laserpisteaineistosta yläviistosta. Pisteet on väritetty sen mukaan kuuluvatko ne todennäköisimmin maanpintaan (oranssi), kasvillisuuteen (vihreä) vai veteen (sininen). Luokittelemattomat pisteet ovat valkoisia. Kuvan ylin piste on virheellinen.

tai rakennuksesta vai onko se virhepiste.

Yllä esitetyt arviot tarkkuudesta koskevat vain maaston korkeusmallia ja virhe esimerkiksi puuston latvustoa kuvaavalle pinnalle on todennäköisesti huomattavasti suurempi. Pintamalliin vaikuttavat yhä samat virheet kuin maaston korkeusmalliin, mutta näiden lisäksi puuston kohdalla on huomioitava sen oma vaikutus. Laserpuls- si heijastuu puusta eri tavalla kuin maanpinnasta tai rakennuksen katosta. Koska pinta ei ole tasainen, kaiku on usein leveä, joten tarkan paluuhetken määrittäminen voi olla epätarkkaa. Lisäksi laserpiste ei yleensä osu täsmälleen puun latvaan, joten lähes kaikki puustosta heijastuneet pisteet ovat todellisen latvapinnan alapuolella.

Puuston korkeusmalleja tuotetaan laserpisteaineistosta, mutta niiden tarkkuus näin harvapisteisellä aineistolla ei ole paras mahdollinen. Rantasen (2011) tekemässä sel-



Kuva 9: Laserpisteaineistosta muodostettu korkeusmalli suoraan ylhäältä. Vaaleampi väri vastaa suurempaa korkeutta. Valkoinen teräväpiirteinen kumpu keskellä mustaa aluetta (järvi) johtuu virhepisteestä.

vityksessä Maanmittauslaitoksen laserpisteaineistosta tuotetussa puuston korkeusmallissa mitattiin keskimäärin 4.2 m systemaattinen virhe ja suuri hajonta (luottamustasolla 99% luottamusväli 3.2 – 5.3 m). Samoissa testeissä yksityisen konsultin tuottamasta pintamallista saatiin tarkempi pintamalli mutta systemaattinen virhe oli edelleen keskimäärin 3.2 m (luottamustasolla 99% luottamusväli 2.2 – 4.3 m). Hajonnan vuoksi systemaattista virhettä ei voitu määrittää kovin luotettavasti. Noin 254 m^2 koealoilla esiintyi jopa yli 8 m eroja todellisen keskikorkeuden ja laserkeilausaineistosta mitattujen keskikorkeuksien välillä. Tätä koetta vastaavilla menetelmillä tehty laserkeilauspintamalli ei siis vastaa tarkasti todellista puuston latvapintaa.

2.6 Fotogrammetrisen- ja laserkeilauspintamallin erot

Mallit eivät vastaa toisiaan täydellisesti. Suurin syy on, että laserkeilaus läpäisee puustoa tehokkaammin. Fotogrammetrisessä mallissa pisteen on erotuttava vähintään kahdella kuvalla ja vaikka piste erottuisi yhdellä kuvalla, se on todennäköisesti puiden peitossa muilla kuvilla. Laserkeilauksessa riittää, että pulssi läpäisee metsän yhdestä kohdasta.

Haala (2009) tutki artikkelissaan fotogrammetrisen pintamallin muodostamista automaattisesti ja vertaili eri kameroiden onnistumista tehtävässä. Osana tätä tutkimusta pintamallia verrattiin myös laserkeilattuun pintamalliin. Osoittautui, että vaikka laserkeilaus tuotti edelleen tarkemman pintamallin, kehittyneillä kuvien yhteensovitusmenetelmillä ja tarkoilla digitaalisilla ilmakuvilla päästiin lähes yhtä suuriin tarkkuuksiin. 8 cm maastoerotuskyvyn kuvista tehdyssä pintamallissa kontrollipisteiden sijainnin neliön keskivirhe oli parhaimmillaan 3.9 cm ja huonoimmillaan 5.3 cm. 20 cm maastoerotuskyvyllä paras tulos oli RMSE 7.6 cm ja huonoin 15.7 cm. Kummassakin tapauksessa RMS oli alle GSD:n. Laserkeilauksella tuotetun pintamallin RMS kontrollipisteissä oli 3.4 cm eli hieman tarkempi. Laserkeilauksen pistetiheys oli 5 *pts/m*². Fotogrammetristen pintamallien pistetiheys on suurempi mutta laserkeilauksen pisteiden pieni keskihajonta tekee siitä tarkemman. (Haala 2009)

Gehrke ym. (2010) saivat erinomaisia tuloksia laserkeilauksen ja fotogrammetrisen pintamallin välillä lasketussa erotuksessa: ero oli keskimäärin 0.8 cm +/- 5.4 cm, kun GSD oli 5 cm. Monilla alueilla oli kuitenkin yli 3 GSD:n ero, joka johtui heidän mukaansa lähinnä ajallisista muutoksista, kuten heinikon kasvusta. Suurin osa puustosta oli tällä alueella, ja on epäselvää, olivatko nämä alueet mukana erotuksen laskennassa. Käytetty algoritmi oli SGM.

Gehrke ym. 2010 kuitenkin toteavat, että laserkeilausdatalla on etu SGM:iin kasvillisuudessa. Laserkeilaus joko läpäisee kasvuston tai mittaa sen latvapinnan konsistentimmin. Haala ym. (2011) mainitsevat myöhemmässä toisessa tutkimuksessa, että fotogrammetrisen pintamallin on vaikea mitata pensaiden ja puiden latvustoa, koska se näyttää hyvin erilaiselta eri suunnista kuvattuna, mikä korostuu suurilla kuvakannoilla. Tutkimuksia fotogrammetrisistä malleista hyvin metsäisillä alueilla ei ole löytynyt. Tässä esitellyissä tutkimuksissa saadut tarkkuudet ovat hyviä, mutta alueet ovat avoimia tai urbaaneja alueita.

Sekä laserkeilaus, että kuvaliitosmenetelmät pintamallien tuotannossa ovat sinällään kohtuullisen tarkkoja. Menetelmien erot johtuvat siitä, että ne näkevät maaston hieman eri tavalla tai mahdollisesta virheestä kolmioinnissa. Näitä voidaan vertailla keskenään, ja olettaa, että kummankaan virhe ei ole kohtuuttoman suuri. Kysymys on, voidaanko kolmioinnin virheen vaikutus erottaa maaston aiheuttamasta kohinasta. Erityisesti on tutkittava lisää, miten metsäalueet saadaan käsiteltyä siten, että ne näyttäisivät samalta laserkeilaus- ja fotogrammetrisissä pintamalleissa.

3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tässä käsitellään tutkimuksessa käytettävä aineisto ja tehdyt testit. Tutkimuksessa on kolme osaa:

1. pintamallien muodostaminen stereomalleista ja laserkeilausaineistosta eri alueilla ja näiden mallien korkeuserotus
2. orientointivirheen vaikutus stereomallien ja laserkeilausmallien erotukseen tapauksessa, jossa saatiin muodostettua mahdollisimman hyvät pintamalli ja
3. menetelmän ajankäytön mittaaminen.

Luvut 3.3.1 ja 3.3.2 käsittelevät ensimmäistä kohtaa. Luku 3.3.3 käsittelee pintamallien vertausta toisiinsa tapauksessa, jossa osaan malleista on tehty keinotekoinen virhe. Luku 3.3.4 käsittelee menetelmään kuluvan ajan mittaamisen.

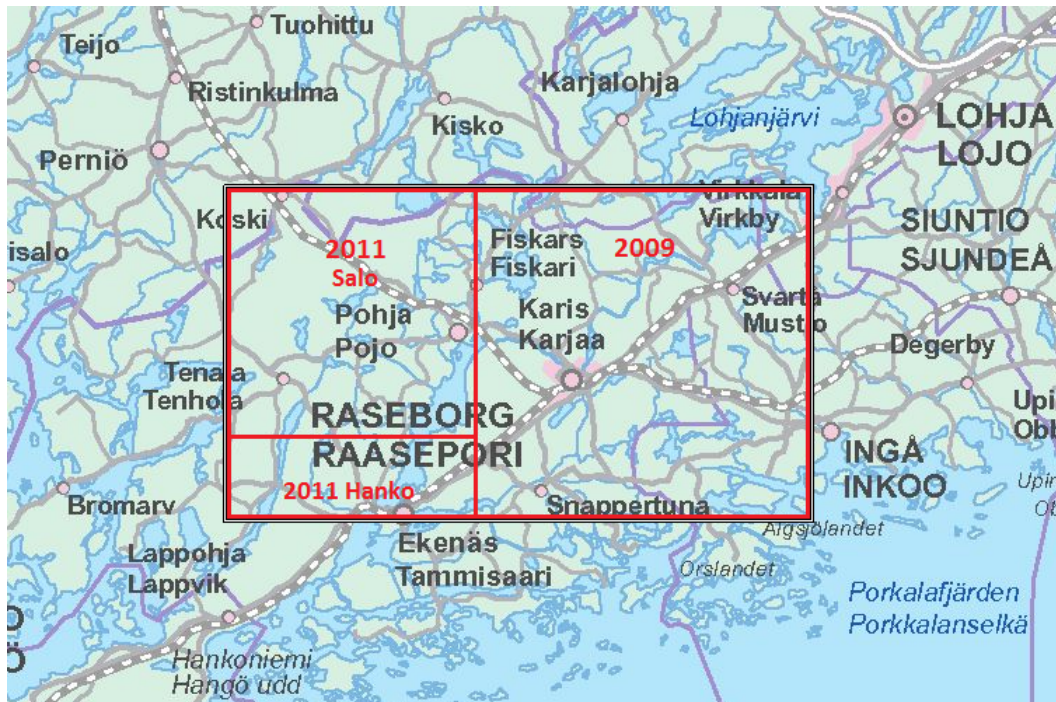
3.1 Aineisto

Testiaineistoksi etsittiin aluetta, joka olisi ilmakuvaattu ja keilattu samana vuonna. Tällaisia alueita oli kuitenkin aineistossa hyvin vähän. Lopulta käytettiin Karjalohjan ilmakuvausaluetta vuodelta 2011. Alueen länsiosaan oli tehty laserkeilaus myös vuonna 2011. Tätä käytettiin laserkeilauspintamallin muodostamista käsittelevissä testeissä. Jälkimmäisessä testissä, jossa tutkittiin virheen löytymistä, aluetta laajennettiin vastaamaan paremmin todellisen ilmakuvausalueen kokoa. Testialue oli silti vain osa käytetystä ilmakuvausblokista. Testialue on esitetty kuvassa 10, johon on punaisella merkitty minä vuonna alueen laserkeilaus oli tehty. Myös laserkeilausalueet ovat suurempia mutta tähän on merkitty vain testialuetta leikkaava osa.

Ilmakuvat otettiin Z/I Imaging DMC -kameralla. Kamerassa on neljä pankromaattista sensoria, joiden kuvat liitetään yhdeksi. Lisäksi kamerassa on neljä värikuvaa ottavaa sensoria: siniselle-, vihreälle-, punaiselle- ja lähi-infrapunakanavalle. Värisensorien ottaman kuvan resoluutio on vain neljäsosa pankromaattisesta kuvasta mutta värikuva voidaan terävöittää vastaamaan sitä. Becker ym. (2005) ovat testanneet, että Pan-terävöitetyn kuvan resoluutio vastaa alkuperäistä pankromaattista kuvaa, tai on joissain tapauksissa jopa parempi.

Lopullisen terävöitetyn nelikanavakuvan resoluutio on sama kuin mustavalkoisella kuvalla: 7680 kertaa 13824 kuvapistettä (Schröder ym. 2011). Kuvan avauskulma on lentosuunnassa 42 astetta ja kohtisuoraan lentosuuntaa vastaan 69.3 astetta (Z/I Imaging 2008). Kuvaus on tehty MML:n tavan mukaisesti 5 km korkeudesta (katso luku 2.3.3), jolloin kuvan koko on noin 3.8 km kertaa 6.9 km ja kuvapisteen koko noin 0.50 m maastossa, mikä täyttää tarkkuusvaatimuksen. Kuvien pituuspeitto on 65 % ja sivupeitto 30 %.

Laserkeilausaineisto on maanmittauslaitoksen korkeusmallituotannosta. Vuoden 2009



Kuva 10: Testeissä käytetty alue, eri vuosina laserkeilatut alueet on rajattu punaisella.

laserkeilaus on tehty Leican ALS 50-II laserkeilaimella. Aineiston metatietojen mukaan lentokorkeus on ollut 1800 m maanpinnasta ja avauskulma 40 astetta. Alueen keskimääräinen pistetiheys on 0.76 pistettä neliömetrillä ja vähintään 0.5 pistettä neliömetrillä. Keskimääräinen pistetiheys on laskettu kaikista pulsseista, eli ainoastaan yksi kaiku pulssia kohden otetaan huomioon. Pisteiden korkeustarkkuus on metatietojen mukaan 0.15 m.

Vuonna 2011 laserkeilatut osat on tehty hieman uudemmalla laserkeilaimella. Käytössä oli Leican ALS 60. Lentokorkeus oli molemmissa tapauksissa 2100 m maanpinnasta ja avauskulma sama 40 astetta. Keskimääräinen pistetiheys on 0.8 pistettä neliömetrillä ja vähintään 0.6 pistettä neliömetrillä. Koska keilain on ollut uudempi, on korkeammalta lentokorkeudelta päästy jopa parempaan pistetiheyteen kuin yllä olevassa vuoden 2009 laserkeilauksessa. Pisteiden korkeustarkkuudeksi on annettu sama 0.15 m.

Aluksi se, että alueet oli laserkeilattu eri vuonna ja jopa eri keilaimilla, ei vaikuttanut hyvältä tutkimuksen kannalta. Kun laserkeilaus ja ilmakuvaualueita tutkittiin, osoittautui kuitenkin, että normaalin ilmakuvaualueen laajuisia alueita, joissa kuvaus ja keilaus olisi tehty samana vuonna, oli hyvin vähän. Tämän vuoksi päätettiin hyväksyä pieni mahdollinen heterogeenisuus alueen osien välillä. Jos tämä ero aiheuttaisi näkyviä ongelmia, se olisi hyvä tietää, mikäli menetelmää muuten voisi käyttää ilmakuvauksen laadunvalvontaan. Korkeusmallituotannossa tarkkuus ja pistetiheysvaatimukset on kuitenkin asetettu niin, että myös eri vuosina ja eri

keilaimilla tehty data on käytännössä samanlaista.

3.2 Fotogrammetrisen pintamallin muodostaminen

Fotogrammetrinen pinta muodostettiin NGATE-ohjelmalla, joka on automaattinen maastomallinluontialgoritmi ja -sovellus BAE Systemsin Socet Set -ohjelmistossa. Algoritmi on osittain piirrepohjainen ja osittain aluepohjainen ja sen toiminta on kuvattu tarkemmin luvussa 2.4.1. Algoritmi muodostaa mallin aina kuvien resoluutiolla, joka tässä tapauksessa on 0.50 metriä mutta tätä laskettiin 2 metriin, jotta se vastaisi laserkeilauspintamallia.

Algoritmi on melko vankka ja se osaa poistaa karkeita virheitä käyttämällä yhden pisteen korkeuden mittaamiseen useampaa kuvaparia. Tämä aiheutti työssä mielenkiintoisen ongelman, koska alustavissa testeissä huomattiin, että, vaikka yhdessä ilmakuvablokin kuvista oli voimakas keinotekoinen orientointivirhe, algoritmi onnistui poistamaan sen vaikutuksen lähes kokonaan. Digitaalisen ilmakuvauksen alkamisesta lähtien Maanmittauslaitoksen kuvauksissa on käytetty 65 % pituuspeittoa (Kupari 2010), minkä vuoksi lähes jokainen maaston piste erottuu ainakin kolmella kuvalla ja mahdollisia kuvapareja, joista mittaus voidaan tehdä, on myös kolme. Vaikka yhden kuvan sijaintitiedot ovat virheelliset, kaksi muuta muodostavat siitä huolimatta virheettömän kuvaparin. Tästä syystä algoritmi jouduttiin pakotamaan käyttämään vain yhtä kuvaparia kunkin pisteen mittaamiseen, jotta mahdolliset orientoinneista syntyvät virheet saatiin näkyviin. Tämä epäilemättä lisää satunnaisvirheitä malleissa.

Muiden algoritmien kuin NGATE:n testaamista ja käyttöä harkittiin mutta ei lopulta toteutettu. Suurin syy tähän oli se, että testit oli yksinkertaisinta tehdä Maanmittauslaitoksessa jo käytettävissä olevalla ohjelmistolla, jotta ne saataisiin tarvittaessa helposti osaksi ilmakuvauksen laadunvalvontaa. Algoritmien tarkkuutta koskevat tutkimukset, joita mainittiin luvussa 2, käsittelevät myös hyvin vähän sen tyyppistä ilmakuvauksaineistoa, jota Maanmittauslaitos tuottaa. Luvun 2 tutkimusten perusteella ei siis voida kovin vahvasti päätellä, mikä olisi paras menetelmä pinnan muodostamiseen, joten tutkimuksessa käytettiin NGATE-ohjelmaa, koska se oli valmiiksi osa prosessia ja siten helpoiten toteutettavissa. NGATE:n ja jonkin muun algoritmin, esimerkiksi Semi-globaalin yhteensovituksen vertailu olisi mielenkiintoista mutta se rajattiin lopulta koetyön ulkopuolelle.

3.3 Testit

3.3.1 Laserkeilauspintamallin muodostamisen eri vaihtoehdot ja sen vertailu fotogrammetriseen pintamalliin

Toisin kuin fotogrammetrisen pintamallin tapauksessa, laserkeilausaineistosta oli helppo tuottaa pintamalli useammalla hieman toisistaan poikkeavalla tavalla. Laserkeilauspintamallin luontia varten testattiin siksi useampaa menetelmää. Tarkoituksena oli saada malli vastaamaan hyvin fotogrammetrista pintamallia. Tässä testattiin kolmea menetelmää, jotka alustavien testien perusteella vaikuttivat lupaavimmilta: rasterointi suoraan gridistä laserpisteiden keskikorkeuden mukaan, rasterointi suoraan gridistä korkeimman laserpisteen korkeuden mukaan ja rasterointi kolmioverkosta, joka muodostetaan kaikkien laserpisteiden välille.

Menetelmillä muodostettiin pintamalli, jonka erotus fotogrammetrisen pintamallin kanssa laskettiin ja tuloksia verrattiin kolmella erilaisella alueella: metsä, pelto ja kaupunki. Metsäinen alue on pääosin puuston peittämää ja pienemmältä osin luonostaan avointa tai hakattua. Alueen ilmakehä näkyy kuvassa 11. Metsäaluetta on (ilmakuvasta päätellen) eri-ikäisiä taimikoita vanhempiin metsiin. Alueen halki kulkee useampi tie mutta nämä ovat kapeita ja hyvin pieni osa pinta-alasta.

Toinen testialue oli peltoalue ja sen ilmakehä esitetty kuvassa 12 ja se koostuu pääosin avoimesta pellostä sekä muutamasta metsäsaarekkeesta ja yksittäisistä puista. Erityisesti alueen halki kulkevan ojan kohdalla on puustoa. Nämä puut aiheuttivat myöhemmin ongelmia, mutta testiaineistosta ei löydetty neliökilometrin kokoista aluetta, joka olisi ollut kokonaan peltoa ja alue haluttiin saman kokoiseksi kuin muut testialueet.

Kolmas alue oli pääosin rakennettua ja sijaitsee Tammisaaren keskustassa, nykyisin Raaseporin kunnan alueella. Ilmakehä on esitetty kuvassa 13. Alueella on pääosin pieniä ja keskikokoisia rakennuksia ja kuten jälkepäin huomattiin myös melko paljon puita. Suomalaiseksi rakennetuksi ympäristöksi se on kuitenkin melko tyypillinen, koska tiheään rakennetut alueet käsittävät melko pienen osa maapinta-alasta.

Kaikki pintamallit tehtiin rastereiksi kahden metrin ruutukoolle. Tämä on sama ruutukoko kuin Maanmittauslaitoksen uudessa valtakunnallisessa korkeusmallissa ja tässä tutkimuksessa käytettiin samaa. Pienempää ruutukokoa ei ole mielekästä käyttää, koska rasteriin tulee silloin paljon tyhjiä arvoja, koska aineiston pistetiheys on harvimmillaan 0.5 pistettä neliömetrillä. Yhteen maastossa 2x2 metrin ruutuun tulee tällöin keskimäärin vähintään kaksi pistettä.

Ensimmäinen pintamallin muodostamismenetelmä oli yksinkertaisesti tehdä laserpisteaineistosta rasteri ja valita jokaiseen rasterin ruutuun sen sisällä olevien laserpisteiden keskikorkeus. Koska aineistosta oli poistettu jo muut paitsi ensimmäisiä



Kuva 11: 2 x 2 km suuruinen metsäalue laserkeilauspintamallin testaamiseksi. Alueen ylälaidassa oleva värimuutos johtuu ilmakuvajonojen reunasta.

kaikuja vastaavat laserpisteet, myös keskiarvo antaa jonkinlaisen kuvan maaston ja puuston yläpinnasta. Toinen menetelmä oli muuten sama kuin ensimmäinen, mutta nyt jokaiseen rasterin ruutuun valittiin korkeimman laserpisteen korkeusarvo. Tämä antaa ehkä luotettavamman kuvan puuston yläpinnasta kuin keskiarvo, koska matalia pisteitä on paljon myös metsäalueilla. Kolmas menetelmä oli muodostaa kaikkien pisteiden välille kolmioverkko. Kolmioverkko rasteroidaan keskiarvoistamalla korkeusarvot, jotta lopputulos on samaa muotoa kuin kahdessa edellisessä mallissa. Tässä menetelmässä on se etu, että tyhjoom rasteriruutuihin ei tarvitse erikseen interpoloida mitään.

Pintamallit muodostettiin kolmelta alueelta kolmella eri menetelmällä ja mallien erotus fotogrammetriseen pintamalliin laskettiin vähentämällä korkeusarvot toisistaan. Tuloksia arvioitiin sen perusteella, miten suuri erotuksen keskiarvo oli, miten



Kuva 12: 2 x 2 km suuruinen peltoalue. Täysin puutonta peltoaluetta ei testialueella ollut.

suuri hajonta oli ja miten mallit visuaalisesti sopivat toisiinsa.

3.3.2 Metsä ja pelto

Tarkasteltaessa laserkeilauksen ja fotogrammetrisen pintamallin eroa metsäalueella eri tyyppisen metsät eroavat toisistaan niin paljon, että mitään metsäaluetta ei teki-jän mielestä voida pitää edustavana otoksena. Laserkeilauspintamallin ja fotogram-metrisen pintamallin onnistumista eri alueilla tutkittiin tämän vuoksi myös toisella testillä hieman eri tyyppisissä metsissä. Tätä varten karttalehtien K3444 ja L3333 alueelta (kuvassa 10 vuonna 2011 laserkeilattu alue) valittiin 16 kappaletta 200 m kertaa 200 m kokoisia alueita ja laserkeilausmallin ja fotogrammetrisen pintamal-lin erotuksen keskiarvo ja keskihajonta mitattiin näillä koealoilla. Koealat valittiin



Kuva 13: 2 x 2 km suuruinen kaupunkialue. Alue sijaitsee Raaseporin kunnassa entisen Tammisaaren keskustassa.

siten, että ne edustivat tiheydeltään ja iältään erityyppisiä metsiä. Paikan päällä tehtyjä mittauksia ei kuitenkaan käytetty vaan ominaisuudet pääteltiin ilmakuvasta. Syy tähän on, että tarkoituksena ei ollut selvittää, kuinka paljon puuston ikä tai muut ominaisuudet vaikuttavat pintamallin keskikorkeuteen ja hajontaan vaan saada kuva vaihtelun määrästä pintamallissa metsäisillä alueella.

Metsien lisäksi suoritettiin uusi testi peltoalueilla, koska ensimmäisessä testissä arveltiin puustosaarekkeiden vaikuttavan liikaa alueen keskikorkeuteen ja hajontaan. Ratkaisu oli poistaa karttalehtien K3444 ja L3333 alueella mallista kaikki alueet peltoja lukuunottamatta. Jäljelle jäänyt malli käsitti ainoastaan erotuksen peltoalueilla ja kaikki peltojen ulkopuoliset arvot korvattiin nolllalla ja ne jätettiin huomiotta keskiarvoa ja keskihajontaa laskettaessa. Irrotukseen käytettiin koko maan käsittävää peltovektoriaineistoa, josta irrotettiin edellä mainittujen karttalehtien alueella olevat peltovektorit.

3.3.3 Orientointivirheen löytäminen pintojen erotuksesta

Suurin testi käsitteli kuvan orientointivirheen löytymistä suuresta määrästä ilmakuvia ja laajalta alueella. Testiä varten laskettiin fotogrammetrinen pintamalli ja laserkeilauspintamalli Karjalohjan ilmakuvausblokin alueelta kuvauksesta vuodelta 2011, joka esitettiin kuvassa 10 yllä. Laserkeilauspintamalli oli testin vertausaineisto ja se muodostettiin koko alueelle yhdeksi rasteriksi 2 m ruutukooalla. Menetelmä oli sama kuin luvussa 3.3.1 kolmioverkon avulla saatu pintamalli.

Fotogrammetrinen pintamallin luonti NGATE-sovelluksella on selostettu luvussa 3.2. Pintamalleja laskettiin kaiken kaikkiaan 13. Yksi oli virheetön vertauspintamalli, jolla selvitetään, paljonko laserkeilaus- ja ilmakuvausaineistossa on lähtökohteisesti eroa. Kuudessa mallissa oli ennen laskentaa poikkeutettu yhden kuvan sijaintiparametrejä. Toisilla kuudella mallilla kaikkien kuvien sijaintia poikkeutettiin todellisesta ennen laskentaa. Nämä kuusi keinotekoista virhettä olivat 1 m tai 2 m itä-, pohjois- tai korkeussuunnassa eri tapauksissa. Itä-, pohjois- ja korkeussuunta vastaavat tässä luvussa 2 esiteltyjen yhtälöiden X, Y ja Z-suuntia. Itäsuunta on likimain samansuuntainen kuvaukskoneen lentoradan kanssa ja pohjoissuunta likimain sitä kohtisuoraan.

Jokaisessa tapauksessa laskettiin fotogrammetrisen pintamallin ja laserkeilauspinnan erotus. Näistä erotuspinnoista laskettiin keskiarvo ja keskihajonta sekä tarkasteltiin, miten suuri virheen vaikutus on verrattuna pintaan, jossa ei ole keinotekoista virhettä. Lisäksi malleista, joissa yhden kuvan orientointi oli virheellinen, arvioitiin, miten hyvin kyseisen kuvan paikka erottuu. Malleissa, joissa kaikkien kuvien orientointi oli virheellinen, laskettiin myös keskiarvo ja keskihajonta peltoalueilla. Aikaisempien testien perusteella (katso luku 4.2) tasaisilla alueilla hajonta oli huomattavasti pienempi, eikä systemaattista eroa mallien välillä ollut.

3.3.4 Menetelmän ajankäytön mittaaminen

Orientointivirhettä etsittäessä koottiin menetelmään kuluva aika. Tarkoituksena oli saada suuntaa-antava arvio siitä, voidaanko yksi ilmakuvausalue käsitellä kohtuullisessa ajassa, jos menetelmää käytettäisiin tuotannon osana. Tietokoneella tehtävää laskentaa voi olla enemmän, jos aktiivista työaikaa tarvitsee käyttää vähemmän.

Mitattavat osat olivat:

- fotogrammetrisen pintamallin laskenta
- laserkeilauspisteiden käsittely, sisältäen:
 - laserpisteiden pakkaus
 - karkeiden virheiden poisto
 - korkeiden pisteiden poisto

- laserkeilauspintamallin laskenta
- pintojen erotuksen laskenta.

Työvaiheet on kuvattu edellisissä alaluvuissa. Saaduista luvuista lasketaan kuluva aika yhtä 1:10000 karttalehteä (6*6 km) kohden. Näitä karttalehtiä käytetään ilma-kuvausalueiden suunnittelun yksiköinä ja esimerkiksi yksi Maanmittauslaitoksessa tuotettu ortokuva kattaa tämän alueen. Vuoden 2013 keskimääräisen kuvausalueen koko oli 33 karttalehteä. Pienimmän kuvausalueen koko oli 3 ja suurimman 70. Testilue on 28 karttalehden laajuinen ollen vain hieman keskimääräistä pienempi.

Fotogrammetrisen pintamallin laskenta tehtiin Maanmittauslaitoksen ilmakuvakeskuksessa käytössä olevalla tehotyöasemalla, joissa on neliytiminen ja 3,06 GHz:n prosessori ja 4 GB muistia. Laserkeilausaineisto käsiteltiin Lastools-työkalulla, joka oli asennettu Ilmakuvakeskuksen käytössä olevalle serverikoneelle. Serverikoneessa on kaksi kahdentoista ytimen ja 2,6 GHz:n prosessoria ja 32 GB muistia. Kummasakin tapauksessa käytettiin sellaista tietokonetta, jolla laskennat käytännössä tul-taisiin tekemään jatkossa, joten aika-arvioita voidaan pitää jokseenkin luotettavina. 4 GB muistia on tehokkaassa laskentakoneessa tavallista pienempi määrä mutta testejä tehdessä osoittautui, että prosessoriteho oli muistia tärkeämpi resurssi ja loppui ennen sitä.

Kovin tarkkojen mittausten tekeminen ei kuitenkaan ollut mielekästä, koska laskenta-aika riippuu hyvin monesta tekijästä. Siihen vaikuttavat esimerkiksi tietokoneen teho, koneen muut prosessit ja käytössä olevat ohjelmat. Tässä halutaan suuruusluokkarvio nykyisellä menetelmällä. Jos tämän pienen alueen laskenta ei onnistu kohtuullisessa ajassa, ei suurempien alueiden käsittely ole järkevää. Yhden ilmakuvausalueen kolmiointi vie tyypillisesti Ilmakuvakeskuksessa käytössä olevilla ohjelmilla ja tietokoneilla vajaan päivän, jos työ ajoitetaan oikein ja pisin osa ei-aktiivisesta laskennasta tehdään yön aikana. Laadunvalvonta ei saisi viedä tähän verrattuna kohtuuttomasti aikaa.

4 Tulokset

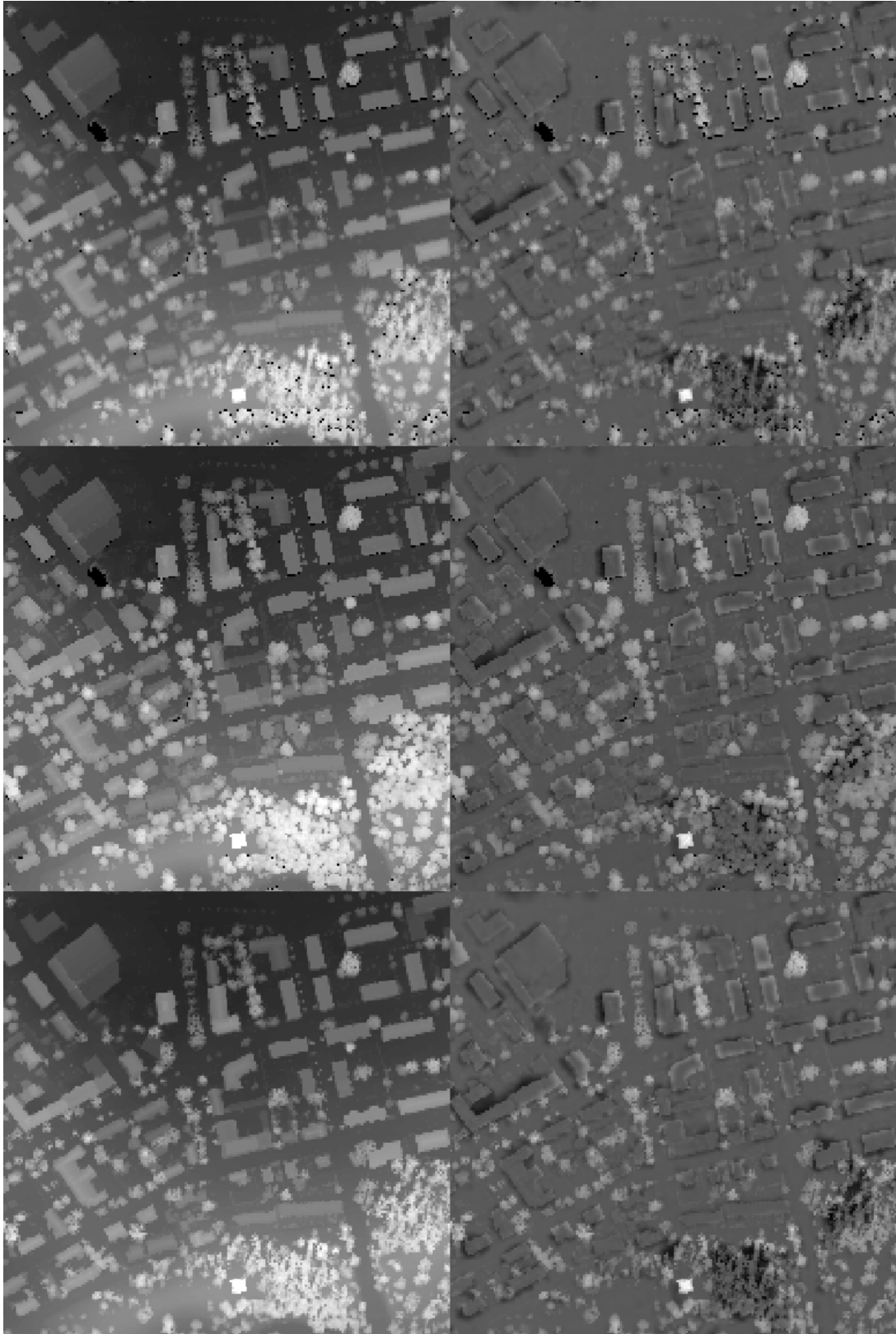
4.1 Laserkeilauspintamallin vertailu fotogrammetriseen pintamalliin

Erotus laserkeilausmallin ja fotogrammetrisen pintamallin välillä laskettiin erilaisilla alueilla. Tiedoista otettiin ylös sekä keskiarvo että keskihajonta ja tuloksia tarkasteltiin visuaalisesti.

Kuvassa 14 on esitetty vertailussa eräs osa kaupunkialueesta ilmakuvassa ja ilmakuvista lasketussa fotogrammetrisessä pintamallissa. Erotus laserkeilauspintamalliin saatiin vähentämällä fotogrammetrinen pintamalli erilaisista laserkeilauspintamalleista, jotka on esitetty kuvan 15 vasemmalla puolella. Kuvan oikealla puolella on laserkeilauspintamallia vastaava erotus fotogrammetriseen pintamalliin. Kuvassa 15 ylimpänä on laserpisteiden kesikorkeuksista rasteroitu pintamalli, keskellä korkeimmista korkeuksista rasteroitu pintamalli ja alimpana kolmioverkosta rasteroitu pintamalli. Pintojen muodostaminen selostettiin tarkemmin luvussa 3.3.1 edellä.



Kuva 14: Vasemmalla puolella on ilmakuva osasta testialuetta kaupungissa. Oikealla on saman alueen ilmakuvista laskettu fotogrammetrinen pintamalli.



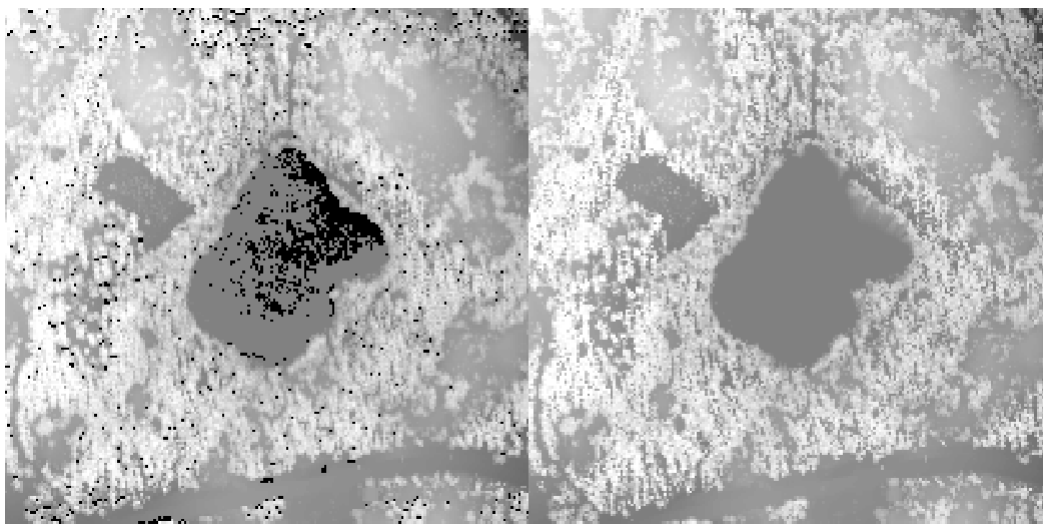
Kuva 15: Vasemmalla puolella on laserkeilausaineistosta laskettu pintamalli kolmella eri menetelmällä: rasteroitu keskiarvo, rasteroitu korkein arvo, rasteroitu kolmioverkko (ylhäältä alas). Oikealla on näistä vähennetty kuvan 14 fotogrammetrinen pintamalli, jolloin on saatu pintojen erotus

Taulukko 2: Alla on esitetty ero fotogrammetrisen pintamallin ja laserpisteaineiston välillä kuvissa 11, 12 ja 13 kuvatuilla alueilla. Eri menetelmien, joilla laserpistepilvestä saadaan pintamalli, tulokset ovat omilla riveillään. Menetelmät pinnan korkeuden määrittämiseksi ovat: ensimmäisten ja ainoiden laserkaikujen korkeuden keskiarvo, korkeimman laserkaikun korkeus ja korkeus laserpisteistä muodostetusta kolmioverkosta. Sarakkeissa ovat eron mittarit: erotuksen keskiarvo (KA) ja keskihajonta (KH)

Menetelmä	Alueen tyyppi					
	Metsä		Pelto		Kaupunki	
	KA	KH	KA	KH	KA	KH
Keskiarvo	-0.984	4.073	0.342	1.246	0.626	4.210
Korkein	0.854	4.316	0.465	1.592	1.577	5.013
Kolmiointi	-1.059	4.263	0.341	1.285	0.587	4.238

Visuaalisesti eri menetelmillä tuotetuista pintamalleista on vaikea löytää eroja ja näyttää siltä, että eri menetelmät tuottavat hyvin samankaltaisia pintoja laserpisteaineistosta. Käyttämällä korkeinta korkeutta rasterissa reunoista tulee hieman terävämpiä. Käyttämällä kolmioverkkoa rasteriin ei jää tyhjiä ruutuja, koska näihin interpoloidaan arvot. Kaikki erot ovat kuitenkin hyvin pieniä. Muita alueita ei ole tässä kuvattu, koska erot menetelmien välillä olivat myös niissä näennäisesti olemattomat.

Tulokset pintamallien erotusten keskiarvoista ja keskihajonnoista on esitetty taulukossa 2. Kuten malleja visuaalisesti tarkasteltaessa, menetelmissä oli lopulta vain vähän eroa myös keskikorkeudessa ja hajonnassa. Suurin ero on, että valittaessa korkein korkeusarvo, systemaattinen virhe mallien välillä (erotuksen keskiarvo) on eri merkinen mutta itseisarvoltaan suunnilleen saman suuruinen metsäalueilla ja hieman suurempi kuin muiden pelto- ja kaupunkialueella. Kolmiointiin perustuva ja suoraan rasterointiin perustuva menetelmä ovat hyvin lähellä toisiaan. Kolmiointi aiheuttaa hieman suurempaa hajontaa metsäalueilla.



Kuva 16: Vasemmalla puolella on rasteroitu laserkeilausmalli pienen lammen alueella. Mustien alueiden kohdalla ei ole laserpisteitä. Oikealla on kolmioverkosta rasteroitu laserpintamalli. Ruutukoko on kummassakin 2 m.

Lopullisissa testeissä käytettiin kolmiointiin perustuvaa mentelmää. Se ei eronnut olennaisesti suorasta laserpisteiden rasteroinnista, ja sillä on se etu, että tyhjiä soluja jää rasteriin vähemmän, koska arvoja interpoloidaan myös alueisiin, joissa laserpisteitä ei ole. Tämä voi jossain määrin lisätä virhettä, koska saadut arvot ovat interpoloituja, eivätkä todellisia mitattuja arvoja. Tulokset viittaavat tähän suuntaan, koska mallien erotus ja keskihajonta ovat hieman huonommat käytettäessä kolmiointia. Ero on kuitenkin vain senttimetrien luokkaa ja alustavissa kokeissa huomattiin, että pelkällä rasteroinnilla tehtyä erotusmallia oli aukkojen vuoksi vaikeampi tulkita visuaalisesti. Esimerkkinä kuvassa 16 on laserpintamalli metsäalueesta ja lammesta, jossa laserpisteaineistoa ei ole. Kuvassa vasemmalla on aineistosta suoraan rasteroitu pintamalli ja oikealla kolmioverkosta rasteroitu pintamalli. Mustat pisteet ovat tyhjiä rasterin ruutuja, jotka näkyvät myös lopullisessa erotuksessa tyhjinä ja saattavat hankaloittaa todellisten virheiden tunnistamista visuaalisesti.

Tulosten perusteella erot eri laserkeilauspintojen välillä ovat huomattavasti pienemmät kuin ero laserkeilauspintojen ja fotogrammetrisen pintamallin välillä. Absoluuttisen tarkan pintamallin sijasta tavoite olikin saada malli, joka vastaisi mahdollisimman hyvin fotogrammetristä mallia. Aineistoissa vaikuttaa kuitenkin olevan perustavanlaatuisen ero. Alueista vain peltoalueella mallit vastaavat toisiaan. Rakennukset ja puut aiheuttavat molemmat samanlaista virhettä malliin. Kuvassa 17 näkyy hyvin korkeiden rakennusten vaikutus.



Kuva 17: Vasemmalta oikealle: Lämpölaitos laserkeilauspintamallissa, fotogrammetrisessä pintamallissa ja näiden kahden erotuksessa. Laserkeilausmalli säilyttää terävät reunat, kun taas fotogrammetrinen tasoittaa ne loiviksi. Tämän vuoksi rakennuksen ääriviivat näkyvät mallien erotuksessa

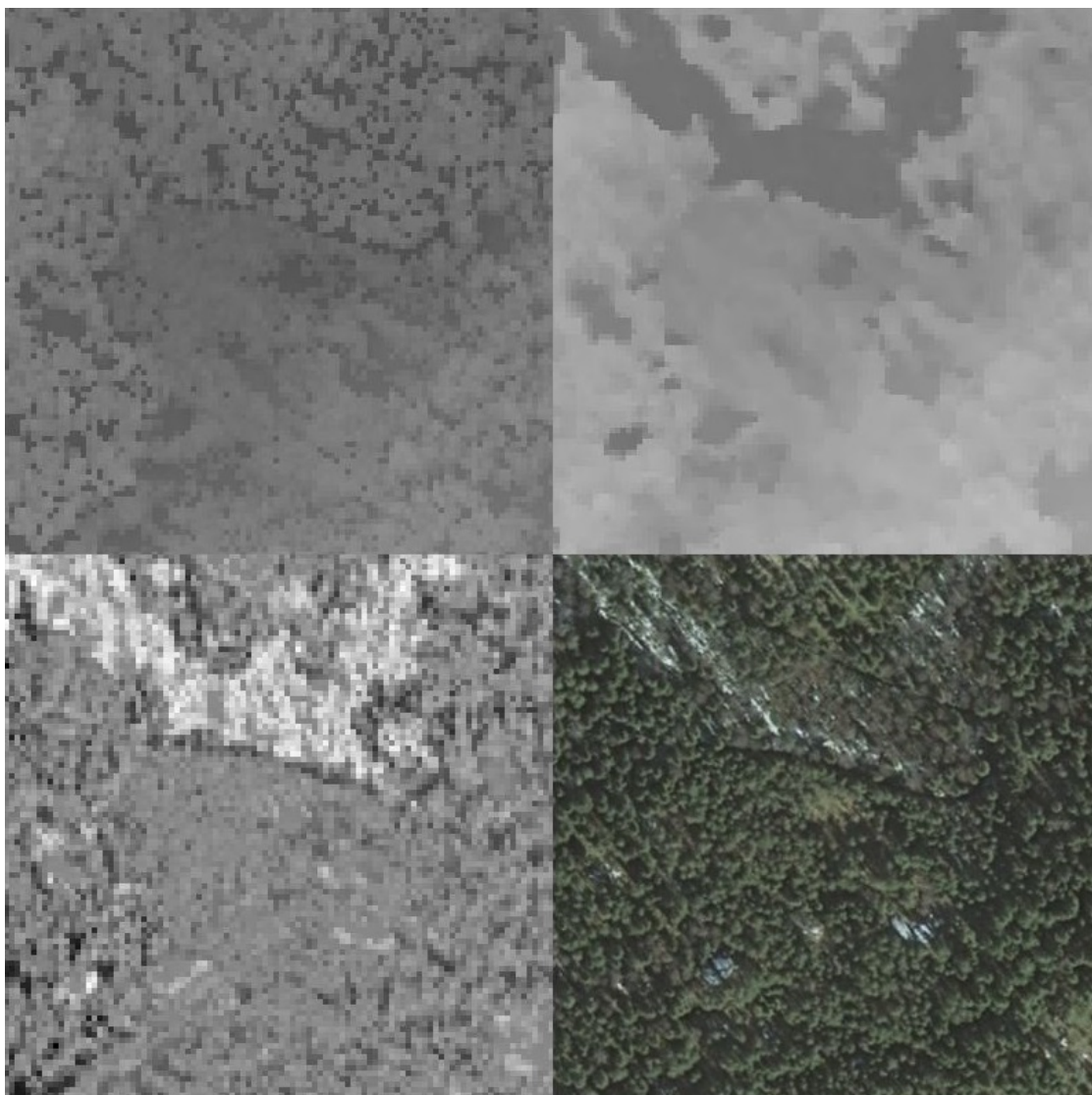
4.2 Metsä ja pelto

Valittujen 16 metsäalueen laserkeilaus- ja fotogrammetrisen pintamallin erotuksen keskiarvot ja keskihajonnat ovat taulukossa 3 alla. Kuten odotettiin, tulokset vaihtelevat hyvin paljon riippuen metsän tyypistä, iästä ja puuston tiheydestä. Laserkeilausmalli laskettiin tässä käyttämällä laserpisteiden korkeuden keskiarvoa ja nähdään, että laserkeilausmalli on systemaattisesti fotogrammetrisen pintamallin alapuolella, koska puuston läpi saadaan laserkaikuja myös maanpinnasta puiden alta. Tämä tapahtuu siitä huolimatta, että viimeiset ja välikaiut on poistettu aineistosta. Paikoin laserpulssi läpäisee puuston tiheässäkin metsässä osumatta matkalla mihinkään.

Vain kahdella alueella keskikorkeus on korkeammalla laserpintamallissa kuin fotogrammetrisessä pintamallissa, jolloin erotuksen keskiarvo on positiivinen. Toinen näistä alueista, alue 3, on kuvassa 18. Vasemmalla ylhäällä kuvassa on alue laserkeilauspintamallissa, oikealla ylhäällä fotogrammetrisessä pintamallissa, vasemmalla alhaalla edellisten erotus. Alueen ylälaidassa puusto on niin harvaa, että ilmakuvilta pintamallin muodostava algoritmi on jättänyt ne huomiotta ja käyttänyt maanpintaa. Tästä todennäköisesti johtuu mallissa oleva "aukko." Laserkeilausmalli puolestaan on havainnut puut ja muodostanut pintamallin likimain niiden latvuston mukaan. Erotuksessa on siksi suuri positiivinen harha. Toisella alueella tilanne oli saman tyyppinen. Siinä suuret yksittäiset puut olivat jääneet pois fotogrammetrisestä pintamallista, vaikka ne näkyivät hyvin laserkeilausmallissa. Yksittäiset puut eivät tule malliin mukaan, koska algoritmi välttää nopeita korkeusvaihteluja, mikä karsii pieniä yksityiskohtia pois mallista.

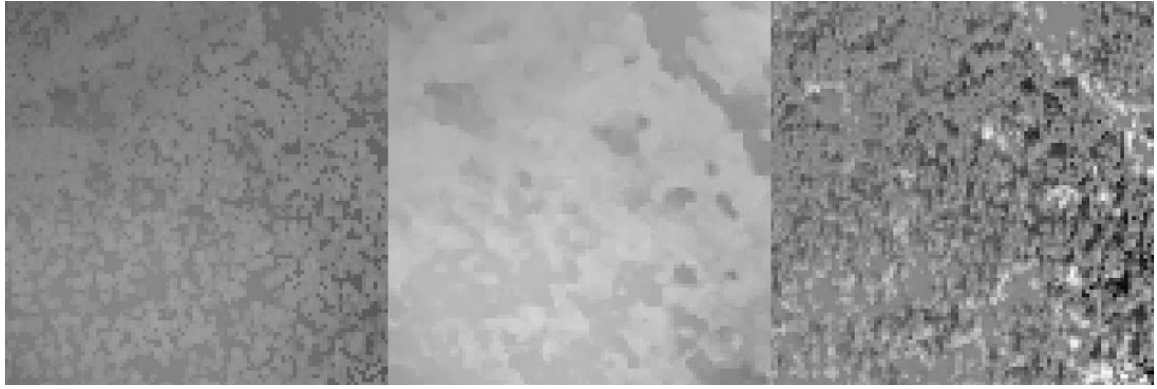
Taulukko 3: Laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotus 16 eri 200 x 200 m kokoisella metsäalueella. Taulukosta nähdään alueilla pintojen erotuksen keskiarvo ja keskihajonta.

Alue nro.	Keskiarvo	Keskihajonta
1	0.095	2.412
2	−1.813	4.742
3	0.155	5.875
4	−2.263	4.183
5	−1.484	5.289
6	−2.593	5.247
7	−2.158	3.933
8	−2.760	7.991
9	−1.106	3.543
10	−1.106	3.543
11	−0.082	4.381
12	−2.177	7.696
13	−1.920	5.264
14	−4.039	5.932
15	−2.374	5.451
16	−2.859	4.714
Sarakkeiden keskiarvot		
	−1.822	5.232



Kuva 18: Kuvassa on metsäaluetestin alue numero 3 (katso taulukko 3). Vasemmalla ylhäällä on alueen laserkeilauspintamalli, oikealla ylhäällä alueen fotogrammetrinen pintamalli, vasemmalla alhaalla laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotus ja oikealla alhaalla alueen ilmakuva.

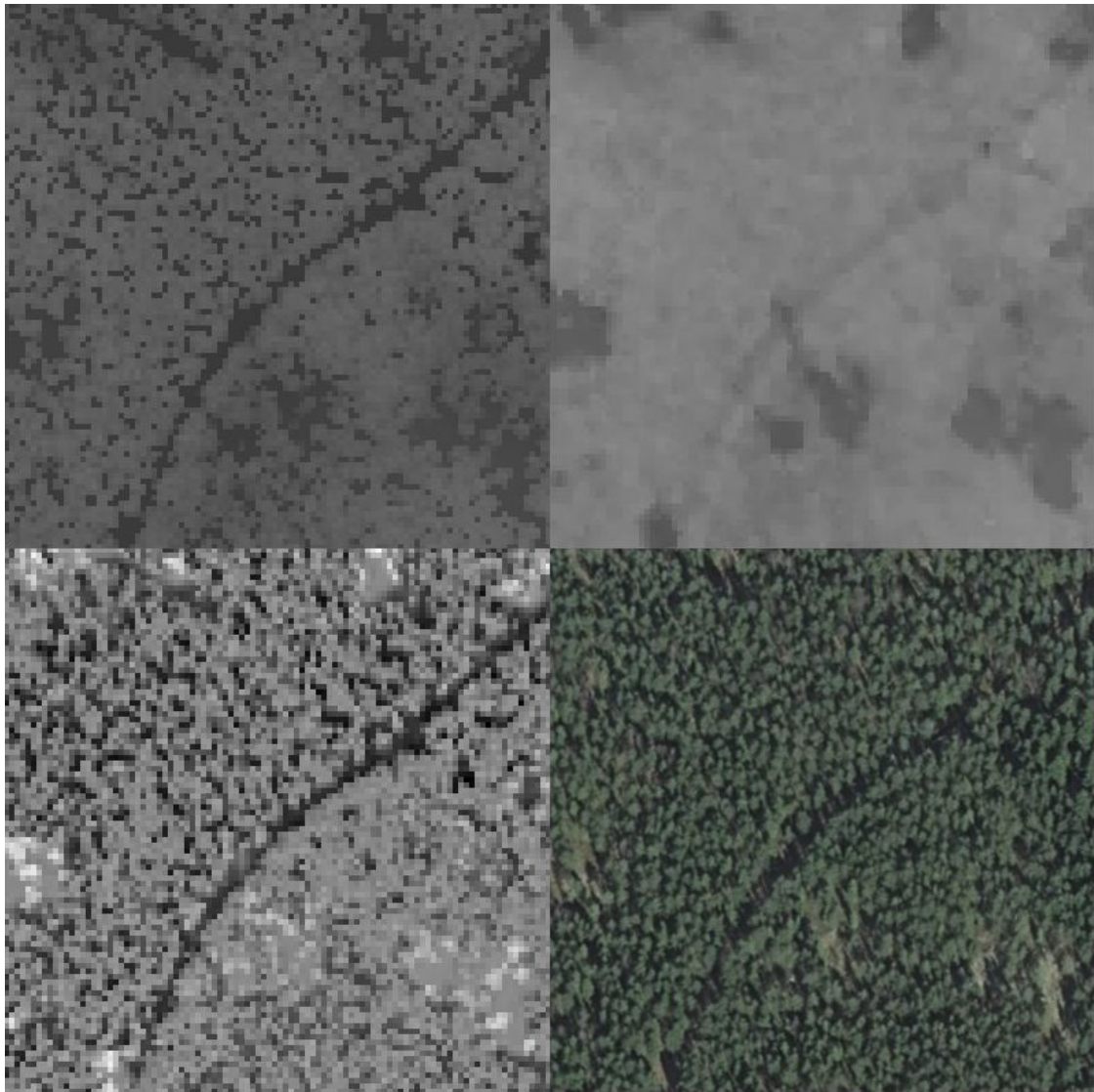
Suurimmassa osassa näistä metsäalueista laserkeilauspintamallin keskikorkeus on noin kaksi metriä fotogrammetrisen pintamallin alapuolella. Keskimäärin erotus on noin -1.82 m ja keskihajonta noin 5.23 m. Kuvassa 19 on alue 2, jossa erotuksen keskiarvo oli -1.81 m ja keskihajonta 4.74 m. Kuvassa on esitetty, vasemmalta oikealle laserkeilauspintamalli, fotogrammetrinen pintamalli ja näiden kahden erotus. Vaaleammat sävyt vastaavat suurempaa korkeutta mutta pintoja ei ole normalisoitu, joten fotogrammetrinen pintamalli vaikuttaa vaaleammalta. Olennainen ero on kuitenkin yksityiskohtien määrä, joka selvästi on pienempi fotogrammetrisessä mallissa. Tämä aiheuttaa mallien erotukseen suuria korkeusvaihteluita. Erotusmal-



Kuva 19: Kuvassa on metsäaluetestin alue numero 2 (katso taulukko 3). Vasemmalta oikealle on kuvattu laserkeilauspintamalli, fotogrammetrinen pintamalli ja viimeisenä toinen vähennettynä ensimmäisestä.

lissa näkyy sekä pieniä vaaleita, että tummia alueita mutta keskiarvon perusteella laserkeilausmallissa on fotogrammetriseen malliin verrattuna liian matalia alueita enemmän kuin liian korkeita.

Suurin ero oli alueella 14, jossa erotuksen keskikorkeus on -4.04 m ja keskihajonta 5.93 m. Tämä alue on esitetty kuvassa 20. Ilmeisesti tällä alueella yllä kuvattu ongelma on korostunut, koska alueella on puita harvassa, jolloin niiden väliin jää enemmän tilaa. Tiheys on juuri sellainen, että laserkeilausmalli noudattelee maanpintaa puiden välissä, mutta fotogrammetrinen pintamalli noudattelee kaikkialla puuston pintaa.



Kuva 20: Kuvassa on metsäaluetestin alue numero 14 (katso taulukko 3). Vasemmalla ylhäällä on alueen laserkeilauspintamalli, oikealla ylhäällä alueen fotogrammetrinen pintamalli, vasemmalla alhaalla laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotus ja oikealla alhaalla alueen ilmakuva.

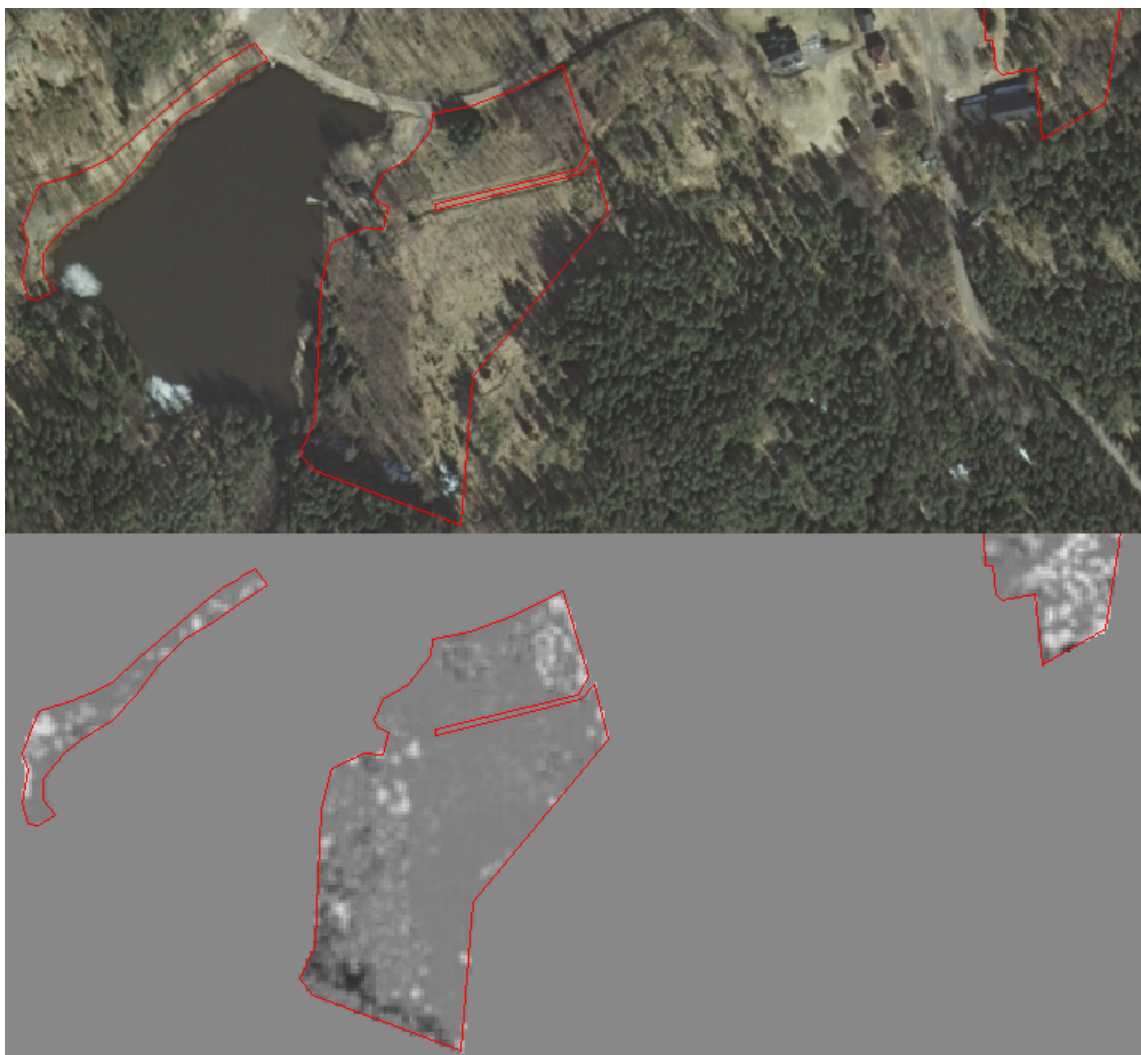
Näistä tuloksista nähdään, että laserkeilaus- ja fotogrammetrisessä pintamalleissa on huomattava ero metsäalueilla. Yksi ero on, että fotogrammetrinen pintamalli välttää nopeita korkeudenmuutoksia pitääkseen pinnan yhtenäisenä. Tästä syystä yksittäiset avoimella kasvavat puut tai hyvin harvassa metsässä kasvavat puut jäävät pois mallista.

Toinen ero on, että laserkeilaus löytää helpommin metsän pohjan, koska lasersäteen on läpäistävä metsä puiden välissä vain yhdestä kohtaa voidakseen tehdä mittauksen metsän pohjan korkeudesta. Fotogrammetrisessä pintamallissa pisteen korkeuden mittaamiseksi sen on erotuttava kahdelta eri kuvalta. Vaikka metsän pohjaa on

paljon näkyvissä ilmakuvissa kuvanadiirissa, vain harvat kohteet näkyvät kahdessa kuvassa, koska puut tulevat eteen sitä enemmän, mitä suuremmassa kulmassa kuvasäde on kohtisuoraa vastaan. Näyttäisi siltä, että mainittujen erojen vuoksi fotogrammetrinen pintamalli seurailee puuston latvustoa tiheämmässä ja maanpintaa harvemmassa metsässä.

Metsän tyyppi siis vaikuttaa merkittävästi laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotukseen. Yllä mainittiin, että fotogrammetrinen pinta noudattelee latvuston pintaa tiheämmässä metsässä mutta ei tiedetä, miten tarkasti tämä vastaa todellista metsän korkeutta, koska pintaa ei verrattu puustonkorkeusmittauksiin. Todennäköisesti tässä on jonkinlainen systemaattinen virhe tai vähintään suurta hajontaa. Samoin laserkeilauspinta, vaikka jossain määrin noudattaakin puuston latvapintaa, sisältää systemaattisen virheen alaspäin, koska laserpisteet harvoin osuvat juuri puun korkeimpaan kohtaan ja tämän virheen suuruutta on vaikea määrittää näin harvasta laserpisteaineistosta kuten kerrottiin luvussa 2.6 (Rantanen 2011). Laserkeilauksella ja ilmakuvilta määritettyjen puuston latvapintojen välillä on siis metsän piirteistä johtuvien virheiden lisäksi todennäköisesti systemaattinen virhe, jota voi olla hyvin hankala määrittää.

Peltoalueilla puolestaan tulokset ovat täysin toisenlaisia. Karttalehtien K3444 ja L3333 alueella laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotus oli keskimäärin -0.055 m ja erotuksen hajonta 1.477 m. Jonkin verran hajontaa aiheuttavat virheellisesti pelloksi tulkitut alueet. Peltolohkovektoriaineistossa on muutamia vanhoja peltoalueita, jotka on joko rakennettu tai ne kasvavat puilta. Esimerkki tällaisesta on kuvassa 21. Punaisella rajatut alueet ovat joskus olleet peltoja. Yläkuvassa on ilmakuva, josta nähdään että pellot kasvavat nyt puita. Alla on laskettu laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallien erotus näillä alueilla. Punaisella rajattujen alueiden ulkopuoli on jätetty tässä huomiotta.



Kuva 21: Osa pelloista ei enää ole pelloja, koska niille on rakennettu tai istutettu metsää. Punainen rajaa alueet, jotka ovat joskus olleet peltolohkoja. Yllä on ilmakuva ja alla peltolohkojen alueella laskettu laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotus.

Virheelliset peltolohkot näyttävät kuitenkin olevan vain pieni osa alueesta. Avoimella alueella voidaan todennäköisesti tutkia laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin eroa ilman liian suurta hajontaa.

4.3 Orientointivirheen löytäminen pintojen erotuksesta

Oheiseen taulukkoon 4 on koottu erotusmallin keskiarvo eli keskimääräinen ero korkeudessa mallien välillä ja se, miten tämä muuttuu kun kaikkien kuvien orientointiin

Taulukko 4: Taulukossa on laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotuksen keskiarvo, keskihajonta ja mediaani testialueella, kun jokaisen kuvan orientointiin lisättiin 1 tai 2 metriä keinotekoisia virhettä.

Suunta	Keskiarvo	Keskihajonta	Mediaani
Ei virhettä kuvien orientoinnissa			
-	-1.021	4.258	-0.799
Orientointivirheen suuruus 1 m			
Itä	-1.021	4.233	-0.577
Pohjois	-1.020	4.259	-0.768
Korkeus	-2.021	4.259	-1.469
Orientointivirheen suuruus 2 m			
Itä	-1.020	4.252	-0.766
Pohjois	-1.015	4.401	-0.452
Korkeus	-3.021	4.260	-2.522

lisätään erilaisia keinotekoisia virheitä. Tässä tapauksessa virhe oli siirtymä kuvan-ottopaikassa. Ylimpänä taulukossa on mallien erotus, kun orientointivirhettä ei ole: keskiarvo -1.021 m ja keskihajonta 4.258 m. Mallien välillä on systemaattinen ero, koska fotogrammetrinen malli on keskimäärin noin metrin korkeampi. Koska luvussa 4.2 esitetyistä tuloksista kuitenkin nähdään, että ero riippuu hyvin paljon maastotyyppistä, eri systemaattisen eron suuruus voi vaihdella toisenlaisille ilmakuvauksalueille. Keskihajonta on suuri, mutta havaintojakin on paljon.

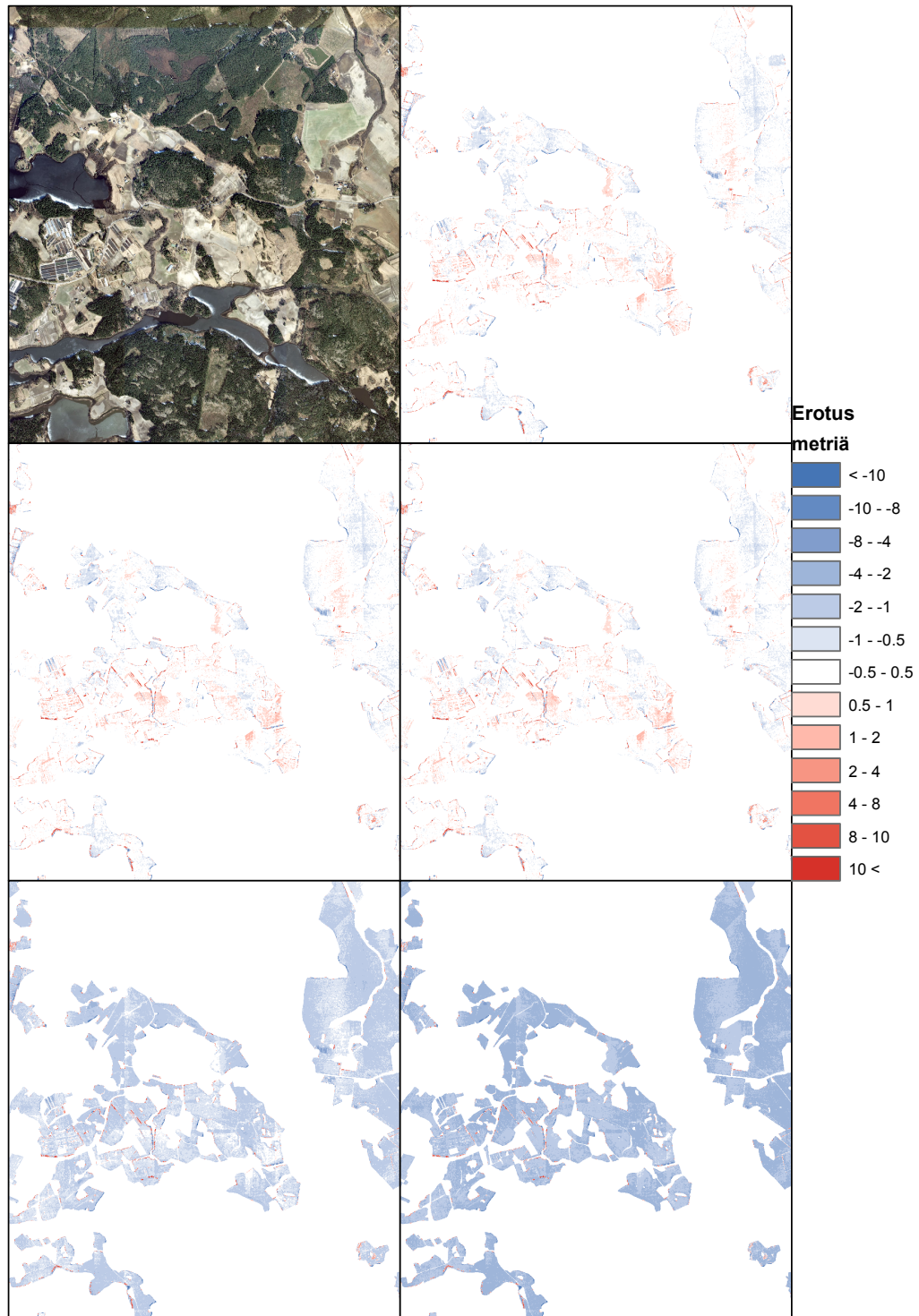
Testialueen itälaidalla erottuu enemmän kuvan 18 kaltaisia virheitä, joissa keilausaineisto on ollut korkeammalla kuin fotogrammetrinen malli. Nämä ovat alueita, joissa puita on kaadettu keilauksen ja kuvauksen välissä, ja koska mallien erotus on laskettu vähentämällä keilauspintamallista fotogrammetrinen pintamalli, tämä erotus on positiivinen. Keilausalueiden välisten erojen tutkimiseksi alue jaettiin kuvan 10 mukaisesti kolmeen osaan ja erotuksen keskiarvo tarkastettiin joka alueella. Mielenkiintoisesti ero on päinvastaisessa suunnassa kuin voisi luulla. 2009 keilatulla alueella erotuksen keskiarvo on -1.209 m, Salon keilauksen alueella 2011 -0.913 m ja Hangon keilauksen alueella -0.324 . 2009 keilatun alueen erotus on pienempi, joten puiden kaataminen ei ole vaikuttanut positiiviseen suuntaan. Puiden vuotuinen kasvu voi tietysti aiheuttaa oman muutoksensa, joka kumoo puiden kaatamisesta aiheutuvan muutoksen. Mielenkiintoista on myös, että ero Salon ja Hangon keilausalueiden välillä on lähes saman suuruinen kuin näiden alueiden keskiarvon ja 2011 keilatun alueen välillä. Alueista johtuvat erot, joita käsiteltiin luvussa, 4.2 ovat todennäköisesti suuremmat kuin ajasta johtuvat erot. Näiden virheiden tarkka määrittäminen voi kuitenkin olla hankalaa.

Taulukosta 4 huomataan, että, kun kaikkia kuvia on siirretty, muutos näkyy vain, kun siirto tehdään korkeussuunnassa. Kun virhe on 1 tai 2 m pohjois- tai itäsuunnassa, tuloksia ei erota virheettömästä tapauksesta. Virhe ei myöskään näy mallissa, erotusmalli on käytännössä saman näköinen. Jos malleja katselee vierekkäin yksityis-

kohtaisesti, pieni ero piirteiden reunoissa on havaittavissa, koska malli on siirtynyt hieman. Ilman ennakkotietoa on kuitenkin äärimmäisen vaikea päätellä, kumpi on virheetön malli, koska erotuspinnassa on hyvin paljon kohinaa ja laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin välillä on muutenkin suuria eroja juuri piirteiden reunoissa.

Erotuksen keskiarvoon siirtymällä itä- ja pohjoissuunnassa ei ole vaikutusta, koska syntyvää virhettä korkeudessa on todennäköisesti keskimäärin yhtä paljon ylös ja alaspäin. Olisi kuitenkin voinut odottaa, että nämä siirrot nostaisivat keskihajontaa verrattuna alkuperäiseen tilanteeseen mutta näin ei ole käynyt. On mahdollista, että, koska siirtymä on enimmilläänkin vain yhden pikselin verran, sen vaikutus peittyy muuhun kohinaan.

Kun virhe on korkeudessa, ero on selvä. Metrin virhe ja kahden metrin virhe ovat siirtyneet suoraan mallien väliseen eroon. Hajonta on kuitenkin edelleen suurempi kuin mallien välinen ero. Visuaalisesti eroa ei ole, ellei väriskaalaa aseteta itse. Eron määrää voi olla kuitenkin mahdotonta päätellä, koska tilanteessa, jossa virheetöntä tapausta ei ole vertailukohdaksi, systemaattisen virheen suuruus ei ole tunnettu. Kuten yllä todettiin, systemaattinen virhe voi vaihdella eri ilmakehualueilla.



Kuva 22: Tässä on esitetty eräs yksityiskohta testialueelta tapauksessa, jossa kuvausalueen jokaisen kuvan orientointia on poikkeutettu. Jokainen kuva vastaa tietyn suuntaista keinotekoisia virhettä aineistossa. Vasen ylä: ilmakuva, oikea ylä: ei virhettä, vasen keskellä: virhe 1 m itäkoordinaatissa, oikea keskellä: virhe 2 m itäkoordinaatissa, vasen ala: virhe 1 m korkeudessa, oikea ala: virhe 2 m korkeudessa. Mittakaava n. 1:54000

Taulukko 5: Taulukossa on laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotuksen keskiarvo (korkeusero), keskihajonta ja mediaani testialueen pelloilla, kun jokaisen kuvan orientointiin lisättiin 1 tai 2 metriä keinotekoisia virhettä.

Suunta	Keskiarvo	Keskihajonta	Mediaani
Ei virhettä kuvien orientoinnissa			
-	-0.127	-1.331	-0.319
Orientointivirheen suuruus 1 m			
Itä	-0.131	-1.312	-0.249
Pohjois	-0.128	1.330	-0.197
Korkeus	-1.130	1.332	-1.246
Orientointivirheen suuruus 2 m			
Itä	-0.136	1.312	-0.196
Pohjois	-0.124	1.388	-0.357
Korkeus	-2.130	1.332	-2.245

Samat tulokset toistuvat, jos tutkitaan vain peltoja. Siirtymät itä- ja pohjoissuunnassa ovat näkymättömiä sekä visuaalisesti, keskiarvossa että keskihajonnassa. Korkeudessa virhe on siirtynyt taas suoraan mallien erotukseen. Nyt mallien ero virheettömässä tapauksessa on kuitenkin hyvin lähellä nollaa: vain -0.127 m. Vaikuttaa siltä että systemaattinen ero on hyvin pieni. Systemaattisesta erosta ei koko ilmakuvausalueella voitu päätellä juuri mitään, koska jokainen ilmakuvausalue on hieman erilainen. Tasaiset alueet eli tässä pellot ovat korkeusmallin muodostamisen kannalta kaikkialla hyvin samanlaisia. Hajontaa on jonkin verran, mutta huomattavasti vähemmän kuin koko mallin alueella. Suurin osa systemaattisesta erosta ja hajonnasta johtunee alueesta, joka on luokiteltu pelloksi, mutta sisältää todellisuudessa harvaa puustoa tai rakennuksia. Tällainen tilanne esitettiin esimerkiksi kuvassa 21. Jos mallien välistä eroa tutkii vain tasaisilla alueilla eron pitäisi siis olla likimain nolla.

Pintojen erotuksen keskiarvot, keskihajonnat ja mediaanit on esitetty taulukossa 5. Erotuksen keskiarvo on 2 metrin keinotekoisien virheen tapauksessa -2.13 metriä ja 1 metrin virheen tapauksessa -1.13 metriä. Fotogrammetrinen malli muuttui joka kohdasta metrin korkeammaksi, jolloin erotuksen itseisarvo kasvoi. Siirtymä on hyvin tarkasti sama, kuin lisätty keinotekoinen virhe. Muilla virheillä mainittavaa eroa ei ole. Siirtymä on niin pieni (kuvan mittakaavassa kaksi metriä on vain yksi kuvapiste), että tämä ei aiheutta näkyvää eroa ja aiheutuneet muutokset korkeudessa kumoavat toisensa, kun virhe on toisella puolella peltoja negatiivinen ja toisella positiivinen. Peltojen reunoissa on muutenkin virhettä, koska peltolohkovektoriaineisto ei ole aivan tarkkaa. Keskihajontoihin ei taaskaan siis tullut muutoksia.

Kuvassa 22 on esitetty pieni pala testialuetta, josta on rajattu kaikki paitsi pellot pois. Sinisen sävyt kuvaavat paikkoja, joissa laserkeilausmalli on matalampi kuin fotogrammetrinen malli ja punainen vastakkaista tilannetta. Valkoisilla alueilla mitausta ei tehty tai ero on alle puoli metriä. Ideaalitapauksessa kuva olisi täysin ta-

Taulukko 6: Taulukossa on laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin erotuksen keskiarvo, keskihajonta ja arvio virheen näkyvyydestä erotuskuvalla, kun yhteen kuvaan oli lisätty keinotekoinen 1 tai 2 metrin virhe.

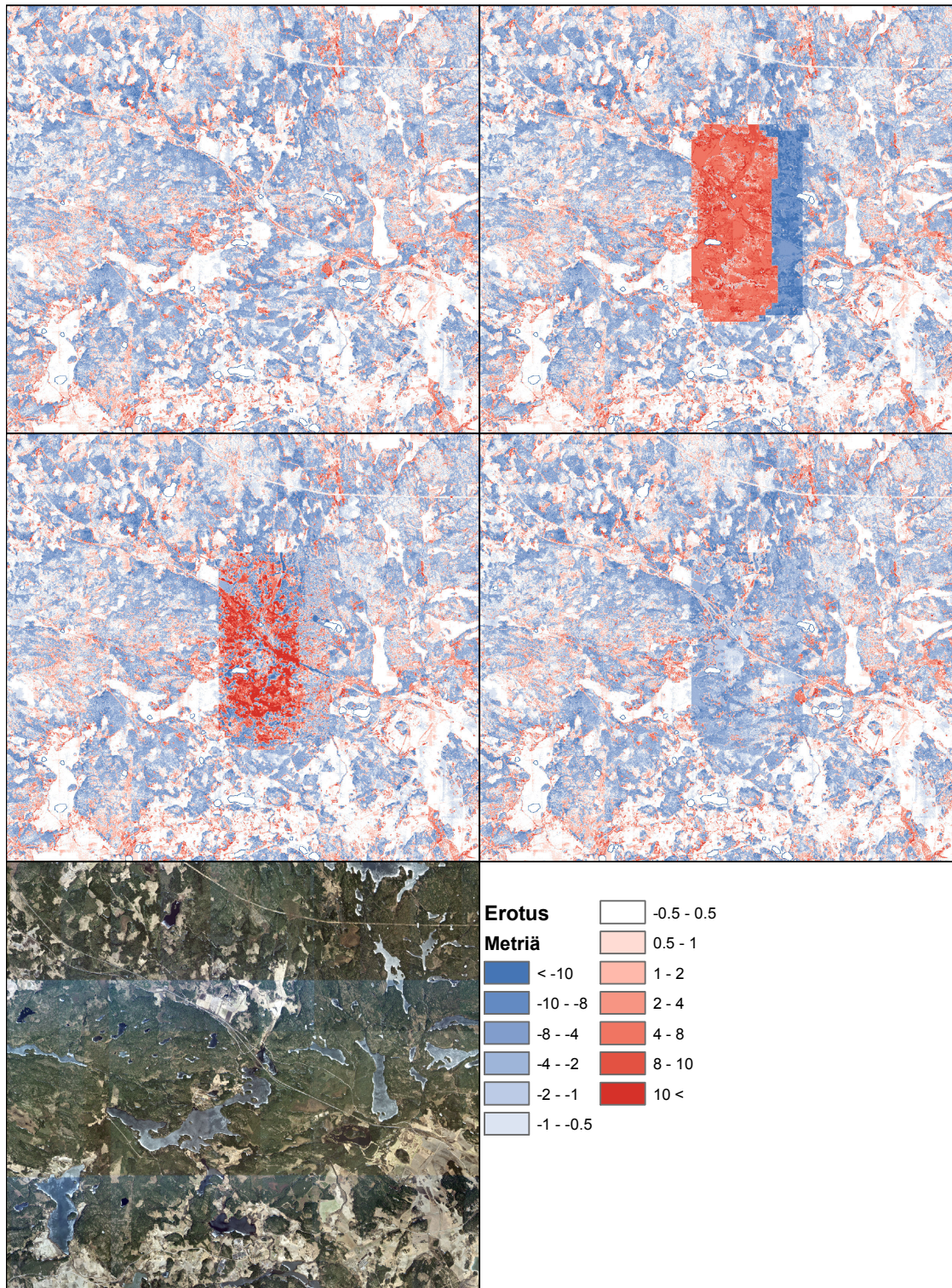
Suunta	Keskiarvo	Keskihajonta	Näkyvyys
Ei virhettä kuvien orientoinnissa			
-	-1.021	4.258	-
Orientointivirheen suuruus 1 m			
Itä	-0.995	4.282	Näkyvä selvästi
Pohjois	-1.021	4.259	Ei näy
Korkeus	-1.029	4.260	Ei näy
Orientointivirheen suuruus 2 m			
Itä	-0.970	4.352	Näkyvä selvästi
Pohjois	-0.975	4.345	Näkyvä selvästi
Korkeus	-1.036	4.264	Näkyvä heikosti

saisen valkoinen. Tapauksessa, jossa keinotekoisista virhettä ei ole, kuvassa esiintyy tasaisesti sinisiä ja punaisia alueita. Mitään systematiikkaa eroissa ei näy. Kun virhe on korkeussuunnassa, tilanne näyttää selvältä. Lähes kaikki peltoalueet ovat sinisiä, koska siirtymä on nostanut fotogrammetristä mallia laserkeilausmalliin nähden.

Toinen osa testiä oli tarkastella tilannetta, jossa yhden kuvan orientointia oli poik-
keutettu vastaavasti 1 tai 2 m itä-, pohjois- ja korkeussuunnassa. Nyt virheen suunta ei ole ilmiselvä, koska koko blokki ei siirry. Tämä aiheuttaa stereomittauksessa vir-
heitä, jotka siirtyvät mallin korkeusvirheiksi. Koska Itäsuunta on likimain kuvakan-
nan suuntainen ja pohjoissuunta sitä likimain kohtisuoraan, tulokset noudattelevat
stereomittauksen virheiden teoriaa. Samanlaisia tuloksia sai myös Vinni (2010), joka
tutki stereomittauksia manuaalisesti.

Taulukossa 6 on esitetty pintojen erotus, kun yhden kuvan orientointia on poikkeu-
tettu. Kaikki tulokset ovat senttimetrien päässä virheettömästä tapauksesta. Vaikka
systemaattisen virheen voisi määrittää tarkastikin, keskiarvoista ei todennäköisesti
voi päätellä mitään suurella ilmakuvaualueella. Tässä on myös taulukoitu, miten
hyvin virhe erottuu kuvalla. Mallien erotusta on havainnollistettu kuvassa 23. Kuten
edellä, kuvassa on taas sinisen ja punaisen sävyillä merkitty erotuksen suuruutta.
Virhe itä-suunnassa erottui hyvin korkeuserona sekä yhden, että kahden metrin vir-
heellä (vain kahden metrin tapaus on kuvattu). Virhe pohjois-suunnassa erottuu,
kun virhe on vähintään kaksi metriä. Yhden metrin virhe näyttää samalta, kuin
virheetön tapaus.

Virhe korkeussuunnassa on ongelmallisempi. Kahden metrin virhe yhden kuvan kor-
keuskoordinaatissa aiheuttaa virheen, joka näkyy juuri ja juuri, vaikka aiheutunut
virhe on alueen reunoilla yli kaksi metriä. Yhden metrin virhe korkeuskoordinaatissa
erottui vielä huonommin ja aiheutti noin yhden metrin virheen mallissa.



Kuva 23: Kuvassa on yksityiskohta testialueesta tilanteessa, jossa vain yhden kuvausalueen kuvan orientointia on poikkeutettu. Vasen ylä, ei virhettä, oikea ylä: virhe 2 m itäkoordinaatissa, vasen keskellä: virhe 2 m pohjoiskoordinaatissa, oikea keskellä: virhe 2 m korkeudessa, vasen ala: ilmakuva.

4.4 Ajankäytön mittaaminen

Työtä tehdessä merkittiin muistiin kuhunkin laskentaan kulunut aika. Laskenta-aikaa ei tutkittu tarkemmin, mutta jokaisen laskennan ajan käytössä oleva tietokone pidettiin vapaana muista prosesseista, joten niiden ei pitäisi vaikuttaa laskentaan. Tässä annetut arvot ovat kuitenkin vain suuntaa-antavia ja tuloksia ei kokeiltu eri kokoisille alueille. Kaikki tulokset ovat taulukossa 7 alla.

Tuloksista nähdään, että pintamallin laskenta on kaikista aikaavievin yksittäinen laskenta. Se vaatii kuitenkin vain vähän aktiivista työaikaa, mikäli malli voidaan luoda suoraan ilmakuvaprojektista siten, että ohjelmaa ei tarvitse vaihtaa. Hyvin suurilla kuvausalueilla, esim. 70 1:10000 karttalehteä, laskenta-aika on jo yli 18 tuntia, jos laskenta-aika skaalautuu lineaarisesti.

Laserpisteaineiston käsittely vie yhteensä noin 15.2 minuuttia karttalehteä kohden. Aktiivinen työaika vaiheiden välillä on lyhyt, koska Lastools-ohjelmalle annetut käskyt ovat melko yksinkertaisia ja kaikki tehdään automaattisesti. Vain karkeiden virheiden poisto vaatii käyttäjältä arviota sopivista parametreista, jotka saattavat riippua käsiteltävästä alueesta. Jos vaiheet voidaan vielä komentotiedoston avulla kettuttaa yhdeksi, laskenta voidaan jättää yön ajaksi käyntiin.

Erotuksen laskenta vie vain joitain minuutteja. Yksi hankalimmista saattaa sen sijaan olla ei-peltoalueiden poisto aineistosta, jos tämä vaihe halutaan tehdä. 28 karttalehden alueen käsittely vei jopa 3 tuntia 31 minuuttia. Peltolohkojen irrotus tätä ennen vie myös noin puoli tuntia aktiivista työaikaa riippuen alueen koosta.

Suurin osa aktiivisesta työstä, kun prosessi on kohdallaan, kulunee tulosten tarkasteluun. Tässä on vaikea arvioida, kuinka paljon aikaa tähän kuluu, koska se riippuu myös muista alueen ominaisuuksista kuin sen koosta (esimerkiksi metsien määrä, topografia) sekä tekijän tarkkuudesta. Erotusmallin keskiarvon ja keskihajonnan lisäksi on kuitenkin tarkistettava, miltä alue näyttää, ja esiintyykö siellä mitään outoa. Aktiivista työaikaa kulunee arviolta kuitenkin vähintään puoli työpäivää.

Taulukko 7: Laserkeilauspintamallin, fotogrammetrisen pintamallin ja erotuspintamallin tekemiseen kuluva laskenta-aika työvaiheittain

Työvaihe	Aika testialueelle	Aika / karttalehti
Fotogrammetrisen mallin laskenta	7 h 15 min	16 min
Laserpisteiden pakkaus	36 min	1,3 min
Karkeiden virheiden poisto	1 h 42 min	3,6 min
Korkeiden pisteiden poisto	2 h 26 min	5,2 min
Laserkeilausmallin laskenta	2 h 24 min	5,1 min
Pintojen erotuksen laskenta	14 min	0,5 min
Peltojen irrotus mallista	3 h 29 min	7,5 min
Summa	18 h 6 min	39 min

5 Johtopäätökset

Toisiaan vastaavien maastonpintamallien muodostaminen laserkeilausaineistosta ja ilmakuvista osoittautui. Kirjallisuustutkimuksen perusteella menetelmien tuottamissa pintamalleissa on perustavanlaatuinen ero. lisäksi testatuista menetelmistä mikään ei antanut kovin hyvää tulosta. Suuressa mittakaavassa pintamallit vastaavat toisiaan melko hyvin. Yksityiskohdissa on kuitenkin paljon eroja. Mittausten perusteella systemaattinen ero oli, että laserkeilauspintamalli oli keskimäärin metrin matalammalla kuin fotogrammetrinen maastonpintamalli.

Laserkeilauspintamalli on näistä kahdesta yksityiskohtaisempi ja oletettavasti tarkempi. Mallissa erottuvat hyvin rakennusten terävät reunat, maaston pienipiirteisemmätkin muodot kuten ojat ja tienpenkat sekä harvoissa metsissä jopa yksittäiset puut. Maanpinta erottuu tiheässäkin metsässä puiden lomasta. Fotogrammetrisessä mallissa rakennukset ja muut jyrkät reunat ovat epäselvempiä ja loiventuneita, koska kaikki kuvasovitusmenetelmät välttävät – enemmän tai vähemmän – mallin epäjatkuvuuskohtia eli nopeita korkeuden muutoksia. Tämä johtaa siihen, että pienimmät yksityiskohdat eivät näy. Yksittäiset puut harvassa metsässä jäävät mallista pois, koska nopea korkeudenmuutos tasoitetaan maanpinnantasoon. Tiheämmässä metsässä fotogrammetrinen pintamalli noudattelee puuston latvapintaa.

Metsät ovat ongelmallisia työn kannalta. Suomen maapinta-alasta 72 prosenttia on metsien peitossa (Tilastokeskus 2003). Vaikka tiheämpään asutut alueet, joita ilmakuvataan useammin, eivät ole yhtä metsäisiä myös käytetystä testialueesta suurin osa oli puuston peitossa. Sopivaa laserkeilauspintamallia etsittäessä pyrittiin saada pintamallista sellainen, että se antaisi tarkkoja tuloksia avoimella alueella, mutta tulokset olisivat siitä huolimatta käyttökelpoisia myös metsäalueella. Laserkeilausaineistosta luokitellut maanpinnan pisteet ovat tarkkoja ja niiden pitäisi vastata 30 cm tarkkuudella maanpintaa. Pelkästään näitä ei voida kuitenkaan käyttää, koska myös puut ja rakennukset on saatava pintaan mukaan.

Laserkeilauspintamallin pitäisi noudatella metsässä latvapintaa eli ylimpiä pisteitä, jotta se vastaisi fotogrammetrista pintamallia, mutta avoimella ylimmät pisteet johtuvat usein häiriöistä. Valittu mentelmä, joka käytti kolmiointia kulkee todennäköisesti hieman todellisen latvapinnan alapuolella ja pinnassa on suuria korkeusvaihteluja puiden välissä, koska mallia ei voida pakottaa käyttämään vain puiden pisteitä. Fotogrammetrinen pintamalli noudattaa tasaisemmin latvapintaa, mutta senkään korkeus ei todennäköisesti ole tarkka. Sekä laserkeilauspintamallissa että fotogrammetrisessä pintamallissa on siis systemaattinen ero todelliseen latvapintaan ja systemaattinen ero toisiinsa.

Verrattaessa metsäalueiden laserkeilauspintamallia ja fotogrammetrista pintamallia laserkeilauspintamalli oli keskimäärin 1.8 m fotogrammetrisen pintamallin alapuolella todennäköisesti suurimmaksi osaksi niiden kohtien vuoksi, joissa laserkeilauspintamallissa ei ole puita vaan pinta noudattaa maanpintaa puiden välissä. Hajonta

oli kuitenkin hyvin suurta ja keskihajonta oli kuudellatoista alueella keskimäärin 5.2 metriä. Tämä aiheuttaa erotuskuvaan suurta kohinaa, joka ei ole satunnaista. Erot vaihtelivat hyvin paljon alueittain ja aluekohtaiset keskiarvot erotuksessa vaihtelivat noin -4.0 ja 0.1 metrin välillä. Erot riippuvat todennäköisesti pääasiassa puuston tiheydestä: tiheä metsä tuottaa vähemmän laserkaikuja maanpinnasta, jolloin latvapinta on laserkeilausmallissa tasaisempi. Todella harvassa metsässä puolestaan puut katoavat kokonaan fotogrammetrisesta mallista, koska korkeusvaihtelu maan ja puiden välillä on liian nopeaa.

Eri menetelmät tutkia laserpisteaineiston ja ilmakuvien eroa rajoittuivat tässä pintamallin muodostamiseen laserpisteaineistosta. Tämä johtui siitä, että käytettävissä olevilla ohjelmilla oli vain yksi mahdollinen tapa muodostaa pintamalli ilmakuvauksineistosta. Useimpia luvussa 2 kuvattuja menetelmiä ei ollut mahdollista käyttää, koska toteutus olisi pitänyt kehittää itse. Käytetyllä menetelmällä, joka perustuu osin reunojen tunnistukseen ja osin kuvaikkunan sovitukseen, on kuitenkin myös selvä etu: se on hyvin nopea. Valmiina olisi ollut myös yksi vaihtoehtoinen kuvaosvitusmenetelmä, mutta se oli äärimmäisen hidas eikä käytännössä järkevä. Jos ohjelmiin on mahdollista saada esimerkiksi Semi-global matching -algoritmi, se on varmasti kokeilemisen arvoinen tulevaisuudessa ja voi parantaa saatuja tuloksia.

Kun keinotekoisien orientointivirheen löytymistä testialueelta kokeiltiin, osoittautui, että laserkeilaus- ja fotogrammetrisissa pintamalleissa oleva perustavanlaatuinen ero teki virheen löytämisen hyvin hankalaksi. Käytetyllä testialueella laserkeilauspintamallin ja fotogrammetrisen pintamallin välillä oli jo lähtökohtaisesti yli metrin keskimääräinen korkeusero ja melko paljon hajontaa. Käytännössä kaikkien kuvien orientoinnissa oleva virhe löytyy vain, jos virhe on korkeussuunnassa, jolloin korkeusvirhe tuli kyllä hyvin esille pintojen erotuksen keskiarvossa. Kun menetelmää testattiin siten, että vain peltoalueita käytettiin erotuksen laskentaan, tulokset paranasivat hieman. Systemaattinen ero oli enää 0.13 m. Kaikkien kuvien siirtymää itä- ja pohjoissuunnassa ei kuitenkaan saatu näkyviin.

Yhden kuvan virheellinen orientointi erottuu visuaalisesti aineistojen pintamallien erotuksessa riippumatta virheen suunnasta, jos se on riittävän suuri. Laadituissa erotuskuvissa nähtiin, miten virheen suunta aiheutti mallille virheen, joka noudatteli stereokuvauksen teoriaa. Virhe ei erotu hyvin, jos aiheutettu korkeusero malliin on alle kaksi metriä. Yli metrin virheitä ei voida kuitenkaan hyväksyä, joten menetelmä ei takaa kaikkien karkeiden virheiden löytymistä. Pintamallien erotuksen keskiarvoon yhden kuvan virheellinen orientointi ei vaikuttanut.

Kuvien kiertovirheitä ei testattu. Voidaan kuitenkin olettaa, että ne aiheuttavat samanlaista korkeuseroa ja deformaatiota mallissa kuin siirrotkin. Olennaista on, kuinka paljon ne aiheuttavat stereomittaukseen vaaka ja pystyparallaksia. Jos virheet ovat tarpeeksi suuria, ne näkyvät pintojen erotuksessa.

Menetelmää voisi kehittää korvaamalla erotuksen laskennan pintojen välisen yhdenmuotoisuusmuunnoksen laskennalla, jolloin itä- ja pohjoiskoordinaatissa olevat vir-

heet tulisivat mahdollisesti näkyviin. Toinen mahdollisuus parantaa menetelmää olisi vertailla teiden sijoittumista eri pintamalleille, koska menetelmä toimii paremmin avoimilla alueilla, kuten nähtiin peltojen tapauksessa. Tämä vaatisi jonkin verran lisätyötä, kun tiet pitäisi tunnistaa pintamallilta.

Yksittäisen kuvan orientointivirheen erottumista on kuitenkin vaikea parantaa. Mallien välistä systemaattista eroa olisi ensin pienennettävä, mikä vaatisi tiheämpää laserpisteaineistoa, suurempiresoluutioista kuvaa tai toista kuvasovitusalgoritmia. Menetelmän aktiivisen työajan käyttö ei kuitenkaan ole kovin suuri, joten menetelmällä on mahdollisuuksia ilmakolmiuinnin laadunvalvonnassa, jos kuvista on joka tapauksessa laskettava kolmiulotteinen pintamalli kuvasovitusmenetelmillä.

Viitteet

Alamús, R. ja Kornus, W. (2008) DMC geometry analysis and virtual image characterisation. The Photogrammetric Record, Vol. 23:124, s. 353 – 371, ISSN: 1477-9730. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2008.00504.x.

Ahokas E., Kaartinen, H. ja Hyypä, J. (2008) On the quality checking of the airborne laser scanning based nation wide elevation model in Finland. XXIst ISPRS Congress, s. 267–270.

BAE Systems. (2007) Next-generation Automatic Terrain Extraction (NGATE). Viitattu: 20.8.2013. Saatavilla: http://www.socetgxp.com/docs/education/white_papers/wp_ngate.pdf

Becker, S., Haala, N. ja Reulke, R. (2005) Determination and improvement of spatial resolution for digital aerial images. ISPRS Hannover Workshop 2005: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. Hannover, Saksa. 17.–20.5.2005. Viitattu: 6.5.2014. 6 sivua. Saatavilla: <http://isprsserv.ifp.uni-stuttgart.de/proceedings/2005/hannover05/paper/097-becker.pdf>

Brown, D. (1971) Close-range camera calibration. Photogram-metric Engineering, vol. 37:8 s. 855–866.

Gehrke, S., Morin, K., Downey, M., Boehrer, N. ja Fuchs, T. (2010) Semi-global matching: An alternative to LIDAR for DSM generation. Proceedings of the 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I.

Haala, N. (2009) Comeback of digital image matching. Teoksessa: Fritsch, Dieter (toimitus). Photogrammetric Week 2009, Stuttgart, Saksa. 7.–11.9.2009. Viitattu: 21.8.2013. S. 289–301. Saatavissa: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo09/290Haala.pdf>

Haala, N. (2011) Multiray photogrammetry and dense image matching. Teoksessa: Fritsch, Dieter (toimitus). Photogrammetric Week 2011. Stuttgart, Saksa. 5.–9.9.2011. S. 185–196 Viitattu: 21.8.2013. Saatavissa: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/190Haala.pdf>

Haggrén, H. (2003) Stereomallin ulkoinen orientointi. Kurssin Fotogrammetrian perusteet luentomateriaali. Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2003. Viitattu: 31.1.2014. Saatavilla: <http://foto.hut.fi/opetus/300/luennot/11/11.html>.

Haikarainen, J. (2007) Lasermallin tarkkuudesta. Testituloksia laserkeilausaineiston ja niistä muodostetun KM2-korkeusmallin erosta Maanmittauslaitoksessa.

Hirschmüller, H. (2005) Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. Teoksessa: Schmid, Cordelia, Soatto, Stefano ja To-

masi, Carlo (toimitus). IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, Kalifornia, Yhdysvallat. 20.–25.6.2005. Vol. 2, s. 807–814. Los Alamitos, Kalifornia, Yhdysvallat: IEEE Computer Society Press. DOI: 10.1109/CVPR.2005.56. ISBN: 0-7695-2372-2.

Holopainen, M., Hyypä, J. ja Vastaranta, M. (2013) Laserkeilaus metsävarjojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5. Helsingin yliopisto, 2013. ISBN: 978-952-10-4533-2. ISSN: 1799-313X.

Inkilä, K. (2012) Analyyttinen Fotogrammetria I -kurssin luentomoniste. 263 sivua. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Maankäyttötieteiden laitos, Espoo 2012.

Kupari, P. (2010) Digitaalinen ilmakuvatuotanto. Maanmittauslaitoksen Ilmakuva-keskuksen ilmakuvatuotannon prosessikuvaus. Maanmittauslaitos, Helsinki.

Maanmittauslaitos. (2013) Laserkeilausindeksit, kuva. Viitattu: 16.1.2014. Saatavilla: http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/Laserkeilausindeksi%202008_2013.pdf

Oksanen, T. ja Sarjakoski, J. (2006) Uncovering the statistical and spatial characteristics of fine toposcale DEM error. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 20:4, s. 345–369. DOI:10.1080/13658810500433891.

Rantanen, J. (2011) Puuston korkeusmallien tuottaminen Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistosta. Projektin raportti. 26 sivua. Maanmittauslaitos, Helsinki.

Rönnholm, P. ja Haggrén, H. (2005) Kurssin Fotogrammetrian yleiskurssi luentomateriaali. Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2005. Viitattu: 16.1.2014. Saatavilla: http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/301_5_2005.pdf

Schröder, C., Sohnle, S. ja Müller, H. (2011) Calibration certificate of Digital Mapping Camera (DMC) for National Land Survey of Finland. Maanmittauslaitoksen DMC-ilmakuvauskameran kalibrointisertifikaatti.

Szeliski, R. (2010) Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2010. E-kirjan vedos. 955 sivua. Viitattu: 21.8.2013. Saatavilla: <http://szeliski.org/Book/>

Tilastokeskus. (2003) Suomi maailman kymmenenneksi metsäisin maa. Viitattu: 2.4.2014. Saatavilla: http://www.stat.fi/tup/tietoaika/tilaajat/ta_01_03_metsat.html

Vilhomaa, J. (2010) Uuden valtakunnallisen laserkeilaukseen perustuvan korkeusmallituotannon aloittaminen Maanmittauslaitoksessa. Maanmittaus, Vol. 85:2, s. 28–37.

Vinni, P. (2010) Stereomallien vääristymät ja fotogrammetristen korkeusmallien vertailu laserkeilattuun korkeusmalliin. Diplomityö, Aalto-yliopiston Maanmittaustieteiden laitos.

Zhang, B., Miller, S., DeVenecia, K. ja Walker, S. (2006) Automatic terrain extraction using multiple image pair and back matching. Teoksessa: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing 2006 Annual Conference, "Prospecting for Geospatial Information Integration". Reno, Nevada, Yhdysvallat. 1.–5.5.2006.

Z/I Imaging. (2008) Digital mapping camera system. Viitattu: 30.1.2014. Saatavilla: <http://www.geospace.co.za/pdf/DMC%20Brochure.pdf>

Costa, L. ja Puska P. (2012) Sähkötekniikan korkeakoulun opinnäytetyön L^AT_EX-pohja.